



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**SOLUCIONES A CORTO Y LARGO PLAZO PARA EL DESLIZAMIENTO SOBRE
EL RÍO GRIJALVA**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL - CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T A :

GRACIELA PÉREZ GARCÍA

DIRECTOR: ING. LUÍS ZÁRATE ROCHA

AÑO 2011





JURADO ASIGNADO:

Presidente: Ing. Chavarri Maldonado Carlos Manuel

Secretario: M.I. Díaz Díaz Salvador

Vocal: Ing. Zárate Rocha Luis

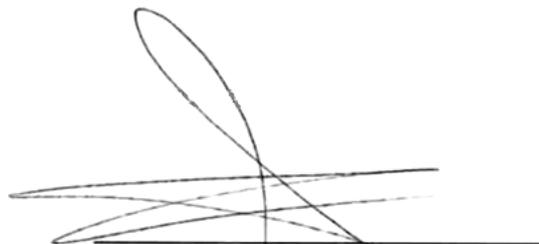
1^{er} Suplente: Dr. Meza Puesto Jesús Hugo

2^{do} Suplente: Ing. Mendoza Sánchez Ernesto René

Lugar donde se realizó la tesis:

México D.F.

TUTOR DE TESIS:



Ing. Zárate Rocha Luis



AGRADECIMIENTOS

A Dios

Sin él nada existiría. Por darme una hermosa familia y brindarnos una gran estrella que ilumina nuestro camino. Por cada uno de mis amigos que me han apoyado en cada etapa de mi vida. Gracias por todas las bendiciones y oportunidades que pones en mi camino.

A mis padres

Ma. Paz García y Alfredo Pérez †

Agradezco a mis padres por su cariño, tiempo, paciencia y enseñanzas. Por el gran esfuerzo y apoyo incondicional que me brindan.

Por enseñarme que las metas se alcanzan con ganas, empeño y perseverancia. Por las lecciones de vida que me dan día a día y ayudarme a descubrir lo importante que es vivir paso a paso, poniendo el corazón, aprendiendo y disfrutando al máximo lo que la vida nos da.

Por mostrarme lo valioso de no perder la capacidad de asombro, manteniendo mi mente abierta a los demás puntos de vista sin perder mi esencia y opinión. Por su honestidad y congruencia.

Gracias por su cariño, sacrificios, desvelos, preocupaciones, enseñanzas, por ser mi más grande apoyo y hacer mi vida tan maravillosa. Agradezco y valoro cada una de sus sonrisas y sus lágrimas, cada una de sus tristezas y alegrías, porque a pesar de que a veces las cosas no son tan sencillas las hacen ver fáciles y perfectas.

A mis hermanos:

Clara, Alfredo, Amelia, Martha, Dolores, Rodolfo, Blas y Elena

Por estar ahí siempre, pase lo que pase.

A mis amigos:

Erick Torres Bonilla

Por brindarme tú amistad incondicional y estar conmigo en las buenas, en las malas y en las peores. Por el gran cariño que me das y todo lo que me enseñas; eres un gran impulso en mi vida y el mejor de los apoyos. Eres muy importante para mí. Gracias por todo lo que compartes conmigo, por ayudarme a abrir mis alas cuando creía que ya no podía volar.

Gabriela Rentería Baeza

Agradezco todo el apoyo que me brindaste para lograr éste objetivo, pero sobre todo muchas gracias por tu amistad, por estar ahí siempre, por todo lo que me enseñaste y lo que aprendimos juntas. Porque siempre tienes una gran sonrisa aún en los días más nublados.

José Manuel Ruiz Galindo

Por motivarme e impulsarme a seguir con mi preparación, por el apoyo y solidaridad que me brindaste y tu disposición a ayudarme. Gracias por todos y cada uno de los momentos que compartimos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), que me ha formado profesionalmente por ser mi alma Máter.

A mis maestros por compartir sus conocimientos y experiencias profesionales.

A la Comisión Federal de Electricidad (CFE) e Ingenieros Civiles Asociados (ICA) por toda la información para la elaboración de éste trabajo.

A los ingenieros Luis Zárate Rocha, Sergio Macuil Robles y Roberto Ayala, por ayudarme a darle forma a este trabajo.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	6
CAPÍTULO I ANTECEDENTES	8
I.1. Introducción capitular	8
I.2. Localización e importancia del Río Grijalva	8
I.3. Fisiografía y Biodiversidad de la cuenca Grijalva- Usumacinta.....	9
I.3.1. Fisiografía y diversidad de la cuenca Grijalva- Usumacinta	9
I.3.2. Biodiversidad de la cuenca Grijalva- Usumacinta	9
I.3.3. Ciclo hidrológico en la cuenca Grijalva- Usumacinta.....	10
I.3.4. Aportaciones al Medio Ambiente.....	11
I.3.5. Afectaciones en la biodiversidad.....	12
I.3.6. Uso del agua en la cuenca.....	13
I.3.7. Contaminación del agua en la cuenca	13
I.4. Entorno Social.....	14
I.4.1. Situación de la población en la región Grijalva- Usumacinta	14
I.4.2. Secuelas de la modernización en la cuenca Grijalva- Usumacinta	15
I.5. Generalidades del sistema hidroeléctrico Grijalva.....	15
I.5.1. Características principales.....	15
I.5.2. C.H. La Angostura	16
I.5.3. C.H. Chicoasén	16
I.5.4. C.H. Malpaso	16
I.5.5. C.H. Peñitas.....	16
I.5.6. Antecedentes de inundaciones en la planicie costera de Tabasco y Chiapas.....	17
I.6. Conclusión capitular.....	17
CAPÍTULO 2 ANÁLISIS DEL DESLIZAMIENTO	18
2.1 Introducción capitular	18
2.2 Deslizamiento sobre el río Grijalva	18
2.2.1 Geología regional	19
2.2.2 Estratigrafía.....	19
2.2.3 Fallas	21
2.2.4 Fracturamiento	21
2.3 Mecanismo de falla	22
2.4 Causas de la falla.....	25
2.5 Conclusión capitular.....	27



CAPÍTULO 3 SOLUCIÓN A CORTO PLAZO.....	28
3.1 Introducción capitular	28
3.2 Trazo del canal	28
3.3 Geología del canal	30
3.4 Excavación del canal.....	31
3.5 Instrumentación	33
3.6 Configuración Topográfica zona del canal.....	35
3.7 Conclusión capitular.....	37
CAPÍTULO 4 SOLUCIÓN A MEDIANO PLAZO.....	38
4.1 Introducción capitular	38
4.2 Hidrología superficial	38
4.3 Estudio hidrológico	40
4.4 Obras de drenaje.....	43
4.4.1 Drenaje superficial	44
4.4.2 Drenaje subterráneo.....	46
4.5 Conclusión capitular.....	50
CAPÍTULO 5 SOLUCIÓN A LARGO PLAZO.....	51
5.1 Introducción capitular	51
5.2 Localización.....	51
5.3 Estratigrafía	52
5.4 Condiciones geológicas.....	52
5.5 Descripción de los túneles.....	53
5.6 Conclusión capitular.....	55
CONCLUSIONES.....	56
REFERENCIAS.....	59
LISTA DE FIGURAS	60



INTRODUCCIÓN

La ingeniería está ligada a la inteligencia, el conocimiento y el compromiso evaluando siempre las consecuencias y riesgos que conllevan nuestras decisiones, pero con el firme propósito de poner nuestro profesionalismo y experiencia al servicio de la sociedad.

El 4 de noviembre de 2007 se presentó un deslizamiento de tierra y roca, aguas arriba de la presa Peñitas, a la altura del poblado de Juan del Grijalva, formando un tapón, obstruyendo el libre tránsito del río Grijalva.

Este fenómeno natural implicó el movimiento súbito de 55 millones m^3 de tierra de los cuales 15 millones obstruyeron por completo el cauce del Río Grijalva, ocasionando la destrucción del poblado Juan de Grijalva y la pérdida de vidas.

Dada la importancia del sistema hidroeléctrico instalado del Río Grijalva constituido por las presas La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas, que se encontraba cercano a su nivel de aguas máximas, era primordial llevar a cabo las acciones necesarias para restablecer la comunicación del río aguas arriba y aguas abajo del deslizamiento, y mitigar las condiciones de riesgo para la zona baja del estado de Tabasco.

Inmediatamente se trabajó en las soluciones de ingeniería de diseño más adecuadas para excavar un canal que reabriera el flujo hidráulico en el Grijalva, con una geometría tal que generara una erosión controlada. Además se convocó a empresas constructoras e instituciones con capacidad de aportar soluciones al problema.

En el sitio del deslizamiento no existía infraestructura alguna, por lo que fue necesario construir caminos de acceso, instalación de líneas para suministro de energía, antenas para telecomunicaciones, implementación de transporte pluvial, terrestre y aéreo, instalaciones temporales, la construcción del modelo físico de deslizamiento en el laboratorio de hidráulica y la instalación de equipos de medición para monitorear el comportamiento de la masa deslizada y realizar numerosos estudios técnicos del fenómeno.

Con la participación de innumerables especialistas, la solución concertada se llevó a cabo en cuatro etapas:

La primera, construir un canal a lo largo del material deslizado, de 800 metros de longitud, etapa que concluyó el 18 de diciembre de 2007 con un volumen excavado de un millón 200 mil m^3 para conducir 500 m^3 /seg.

La segunda etapa, concluida el 12 de marzo de 2008, fue ampliar el canal, aumentando el ancho de plantilla de 6 a 70 m; para ello se removieron un millón 900 mil m^3 incrementándose la capacidad de conducción a 4 mil m^3 /seg. Esta capacidad permitió reducir en forma controlada los niveles de los embalses ubicados aguas arriba del deslizamiento y estar en condiciones óptimas para recibir la siguiente época de lluvias.



La tercera etapa de los trabajos se inició el 12 de marzo de 2008 y consistió en la construcción de un drenaje superficial para captar los escurrimientos del área más lejana del canal mediante una galería de drenaje y una zanja-dren de 1,054 m en la cañada derecha, aunado a la remoción de 500 mil m³ para reducir la inclinación de los taludes y mejorar la estabilidad del canal.

La cuarta etapa consiste en dos túneles de 14 m de ancho cada uno, y 14 m de altura, con los que se pretende comunicar el embalse de aguas arriba del Tapón a aguas abajo para asegurar razonablemente el libre curso del río y tener el control necesario del sistema.

El acceso al sitio se llevó a cabo por vía fluvial, terrestre y aérea utilizando pangas, remolcadores, lanchas con motores fuera de borda, camiones todo terreno, camiones pipa y helicópteros.

El movimiento de tierra del deslizamiento se llevó a cabo empleando maquinaria pesada como tractores sobre orugas, retroexcavadoras, martillos hidráulicos, camiones articulados, cargadores frontales y equipos de perforación.

Sin duda, el principal reto de este proyecto fue la premura para enfrentar el problema, actuando con decisión, objetividad y realismo ante las condiciones de riesgo y efectuando la organización y la convocatoria eficaz para que en unas cuantas horas se iniciaran los trabajos necesarios para remediar el problema.

Las acciones interdisciplinarias realizadas para resolver el deslizamiento sobre el río Juan de Grijalva fueron un éxito para la ingeniería mexicana ya que involucró un alto grado de complejidad, pero se diseñó y ejecutó oportunamente en condiciones de adversidad y en tiempo récord.



CAPÍTULO I ANTECEDENTES

I.1. Introducción capitular

En el río Grijalva se tienen construidas las presas La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas; este sistema hidroeléctrico es uno de los más importantes del país porque produce el 23% de la energía eléctrica utilizada en el territorio nacional.

Llueve prácticamente todo el año, en el verano las lluvias son muy intensas; entre el otoño y el invierno se presentan lluvias prolongadas y torrenciales asociadas a los fenómenos meteorológicos.

I.2. Localización e importancia del Río Grijalva

La cuenca del Grijalva-Usumacinta se localiza en el sureste de la República Mexicana y administrativamente comprende los estados de Tabasco y Chiapas y pequeñas porciones de Campeche.

Su extensión territorial es de 91,345 km² y representa el 4.7% del territorio nacional. Su población es de 4,919,793 habitantes que corresponden al 5% de la población de México, según los últimos datos del XII Censo General de Población y Vivienda del año 2000 (INEGI 2000). Se concentra especialmente en estuarios, como Tonalá-Coatzacoalcos y planicies de inundación en el Bajo Grijalva, con densidades que duplican la media nacional. Sus latitudes extremas son al norte los 18°39' latitud norte y al sur los 16° 30' latitud norte, al extremo oriente se ubica en los 90°22' y al oeste en los 94°38'.

El río Grijalva nace en los Altos de Cuchumatanes, en Guatemala, en Chiapas la corriente sigue con una dirección sureste-noroeste, a todo lo largo de la Depresión Central del mismo estado. Este río, recibe una gran variedad de nombres, de acuerdo al lugar por donde cruza. En el Cañón de la Angostura se denomina Río Chejil, cuando entra a México lo llaman Río Cuilco, en el Cañón del Sumidero; Río Mezcapalapa, en la Depresión Central; Río Grande de Chiapa, en el Cañón del Sumidero recibe el nombre de Río Mezcalapa, y al llegar a su parte final lo llaman Río Grijalva.

Aproximadamente 350 de 766 km, que es el total del largo de la cuenca del Río Grijalva, se encuentran en el estado de Chiapas. Debido a su gran extensión el Río Grijalva es cruzado por más de 15 puentes, destacando entre los más importantes: Puente Belisario Domínguez, Puente Peñitas, Puente de Acala, Puente de Frontera Comalapa y Puente Grijalva.

El Río Grijalva nace a 4,026 m de altura en el volcán Tacaná en Guatemala; se alimenta de los ríos San Miguel y San Gregorio para tener una cuenca de 53,000 km² y una longitud de 700 km. Desde el Tacaná comienza su descenso, recorre la Depresión Central del estado de Chiapas, y en Nandayapa continúa el descenso para ser cocreador del imponente Cañón del Sumidero, de 25 km de longitud. Sigue su camino para ser



despedido de Chiapas por el volcán Chichonal, y desciende en la llanura tabasqueña; casi en la frontera con Campeche se une con el Usumacinta, y juntos conforman la red fluvial más importante de la República Mexicana. El Grijalva y el Usumacinta desembocan en el Golfo de México

La cuenca del Grijalva contiene a las presas La Angostura, Chicoasén, Nezahualcoyotl y Peñitas; este sistema hidroeléctrico es uno de los más importantes del país porque produce el 23% de la energía eléctrica utilizada en el territorio nacional.

Las características ambientales, climáticas y de suelos de la cuenca permiten almacenar grandes volúmenes de agua. Existen 19 acuíferos identificados en la región. La principal zona de recarga se encuentra en la Sierra de Chiapas y en las épocas de lluvia la realimentación se lleva a cabo por infiltración vertical o por las numerosas corrientes superficiales. Se estima esta recarga en 7,008 Mm al año y un ritmo de extracción de 674 Mm³ al año, lo que da como resultado una disponibilidad estimada en 6,334 Mm³.

I.3. Fisiografía y Biodiversidad de la cuenca Grijalva- Usumacinta

I.3.1. Fisiografía y diversidad de la cuenca Grijalva- Usumacinta

La región de los ríos Grijalva y Usumacinta, es una de las zonas ecológicas con más alta diversidad biológica y cultural del territorio mexicano, sus ecosistemas albergan el 64% de la biodiversidad nacional conocida, es de las mayores reservas de aguas dulces del país, la región del Grijalva-Usumacinta es una de las más ricas entre las situadas en la franja intertropical conocida como el Cinturón genético de la Tierra.

Como todos los bosques y selvas tropicales del planeta, las masas forestales del Alto Grijalva-Usumacinta se caracterizan por su enorme biomasa vegetal, sus elevadísimas reservas de elementos nutritivos y su rápido reciclaje. Los bosques de coníferas crecen en las partes más altas, en los macizos montañosos de la región. Con un clima cálido, con temperaturas promedio de 24°C y precipitaciones de 4,000 mm anuales, las selvas húmedas ocupan todavía una parte considerable de las zonas oriental y central de la Sierra de la Lacandona. Aunque representan apenas el 0.4% del territorio nacional, en ellas habitan más del 20% de los vertebrados terrestres conocidos en México, se han registrado 984 especies vegetales, 341 especies de aves, 112 de mamíferos, 77 de herpetofauna y 160 especies de árboles en la región y el total se estima en unas 4,000.

Los selvas tropicales subhúmedas se presentan en el Alto Grijalva y en los declives de la Depresión Central de Chiapas, por debajo de la cota de los 1,500 msnm y se desarrollan en climas cálido-templados y cálidos (entre los 20 °C y los 29°C) con abundantes lluvias de verano. Separadas de las selvas húmedas, la diversidad de estas selvas no es menor: se han registrado en ellas 989 especies.

I.3.2. Biodiversidad de la cuenca Grijalva- Usumacinta

La extensa zona de humedales costeros que bordea el sur del Golfo de México resulta una de las más importantes del planeta. Sus planicies costeras forman la parte oriental de



la compleja llanura deltaica del sistema Grijalva-Usumacinta. Sus humedales (manglares, popales y tulares) cubren 259,000 ha del litoral y se consideran como las más destacadas coberturas de humedales costeros del sur del Golfo de México. Junto con los de Tabasco, integran la unidad de almacenamiento energéticos más importante de Mesoamérica.

La productividad primaria neta de estos humedales es del rango de 75 ton/ha/año y en ellos la degradación y mineralización de la materia orgánica es mucho más rápida que en las zonas templadas. Una multitud de organismos y de plantas acuáticas emplea directamente una parte de los minerales liberados. Otra porción es exportada a los ecosistemas litorales adyacentes y al mar. Albergan 45 de las 111 especies de plantas acuáticas reportadas para México, lo que la convierte en la reserva más valiosa de plantas acuáticas de Mesoamérica.

Es la mayor área de hibernación de aves acuáticas del Golfo de México. La enorme variabilidad de los niveles del agua ocasionada por las lluvias torrenciales que se precipitan entre junio y septiembre, forman miles de lagos y pantanos ricos en alimentos para una verdadera multitud de aves y animales acuáticos. Los humedales del delta del Grijalva-Usumacinta albergan cuatro o cinco grandes colonias de anidación que se han estimado cada una en 50,000 parejas de aves. Esta clase de ecosistemas se encuentran entre los más productivos y ecológicamente más complejos de la Tierra.

Su alta diversidad de factores ambientales, de hábitat, de conexiones internas e interacciones con los ecosistemas adyacentes (manglares, humedales costeros, pastos marinos y arrecifes coralinos) los dotan de una elevada productividad primaria y de una gran riqueza de fauna y flora. La productividad primaria neta de estas lagunas costeras se ha estimado entre 500 y 4,000 g de peso seco/m²/año, la de los manglares en 24 ton/ha/año de peso seco y la de los arrecifes coralinos mayor de 15 ton/ha/año de peso seco.

I.3.3. Ciclo hidrológico en la cuenca Grijalva- Usumacinta.

El movimiento del agua es el factor ambiental crítico que organiza la vida y vincula a los ecosistemas fluviales, costeros y marinos de esta región hidrológica. La forma y los ritmos de la circulación del agua determinan la productividad, la estabilidad y la salud general de este supersistema hidrológico. La regularidad de los factores que mantienen los equilibrios dinámicos de la circulación del agua hacen de la región un complejo mecanismo auto-sostenido: mantiene un sistema general de circulación de energía, transporta nutrientes y minerales desde las fuentes (bosques de coníferas y selvas tropicales) hasta los grandes sistemas de almacenamiento (planicies, pantanos, lagunas costeras y plataforma continental) y transforma estos nutrientes en energía disponible para los organismos en sus distintas áreas de alimentación (manglares, praderas de pastos marinos, plataformas continentales y arrecifes coralinos).

Todos estos mecanismos regulados por el ciclo hidrológico concentran en la cuenca del Grijalva-Usumacinta el 30% de los escurrimientos de los ríos de México (147 km³ /año) y convierten a este enorme hidrosistema ecológico en el almacén de la más alta biodiversidad conocida de México: es el hábitat del 67% de las especies vivientes en el territorio nacional y ocupa el primer lugar a nivel nacional en número de plantas



superiores (20,000 especies), de peces de aguas dulces (150 especies), de anfibios (180 especies) y de aves (240 especies).

La invasión de masas de aire frío del norte y húmedos tropicales del Atlántico y el Pacífico provocan la mayoría de las precipitaciones anuales en la región. Lluve prácticamente todo el año, el 83% de los 365 días, pero especialmente las precipitaciones se concentran en verano, otoño e invierno. Sólo la primavera es relativamente seca. En el verano las lluvias son muy intensas. Entre el otoño y el invierno soplan los nortes, con lluvias prolongadas y torrenciales. Los ríos y lagunas alcanzan sus máximos niveles entre septiembre y noviembre, lo que vuelve a la planicie un espejo de agua.

Es la época de las inundaciones, que provocan desastres en la agricultura y las poblaciones asentadas en la llanura costera del norte. La conformación litológica de los márgenes de los ríos y de los suelos de aluvión, la sinuosidad de los cauces, con abundantes meandros y las grandes descargas de sedimentos y materiales de las cuencas altas hacen de la planicie un área fácilmente erosionable y sujeta a las grandes inundaciones que se dan periódicamente en la llanura costera, especialmente en el área conocida como “Olla de la Chontalpa”. Esta situación ha obligado a la construcción de estructuras especiales de defensas permeables las que, sin embargo, no han solucionado los problemas en épocas de avenidas y de fenómenos extremos.

En estas condiciones impuestas por el ciclo hidrológico, la pérdida de suelos por erosión hídrica extrema y muy extrema afecta al 89% del territorio de Tabasco y al 83% de Chiapas y alcanza valores de pérdidas de suelos mayores a las 500 ton/ha/año. La erosión hídrica es especialmente crítica en la Sierra Madre de Chiapas, los Altos de Chiapas y en las montañas marginales del norte, donde los valores van de severos a extremos (mayores a 100 ton/ha/año); severa y alta (de 25 a 100 ton/ha/año) en la Selva Lacandona, Valles centrales y Malpaso, provocados y acelerados por los intensos procesos de deforestación que ocasiona la erosión de laderas, frecuentes derrumbes y caídas de árboles que obstruyen el flujo del agua y provocan taponamientos e inundaciones.

Actualmente se presentan problemas críticos de inundaciones en 10,531 ha de la planicie costera, especialmente en la zona central de Tabasco y en las llanuras del Usumacinta, cuyas consecuencias catastróficas se ven magnificadas por el crecimiento desordenado y sin ninguna planeación de cientos de comunidades rurales y por el crecimiento explosivo de las periferias urbanas en zonas de alto riesgo: áreas bajas, planicies inundables e incluso dentro de los cauces y los vasos de presas, lo que ha obligado a realizar costosas obras de defensa.

I.3.4. Aportaciones al Medio Ambiente

Entre los servicios que nos dan los ecosistemas de la cuenca se encuentran: la regulación de los ciclos biogeoquímicos, el mantenimiento de los flujos hidrológicos y la recarga de los acuíferos, la conservación de la productividad biológica y la biodiversidad de sus ecosistemas. Sus funciones ecológicas son: la regulación climática, la capacidad de recuperación frente a las perturbaciones ocasionadas por fenómenos meteorológicos extremos, el control de flujos, la oferta de aguas dulces, el control de la erosión, la



retención de sedimentos y la formación de suelos, el reciclaje de nutrientes, el tratamiento y control biológico de desechos, la creación de áreas de refugio para la fauna silvestre, el establecimiento de zonas de producción de alimentos, la conservación de bancos genéticos, la generación de espacios habitables para sus poblaciones humanas.

I.3.5. Afectaciones en la biodiversidad

Como parte del proceso de modernización de las estructuras productivas de México, el gobierno federal promovió la ocupación del trópico, mediante una estrategia basada en tres líneas de acción:

- Una política de colonización y desmontes que se orientó a eliminar grandes extensiones de selvas tropicales y establecer en las superficies desmontadas programas de cultivos alimenticios, inicialmente, y una agricultura comercial de plantación y la ganadería de bovinos.
- El aprovechamiento de sus recursos hídricos, con la finalidad de crear el más grande complejo hidroeléctrico del país.
- La explotación de sus ricos yacimientos petroleros.

Los resultados de estas políticas se reflejaron directa e indirectamente en el funcionamiento de este delicado hidrosistema tropical. En el breve espacio de medio siglo, Chiapas y Tabasco vieron sus espacios naturales transformados en favor de una agricultura comercial de plantación y una ganadería extensiva de bovinos. En tan solo medio siglo, Chiapas, uno de los estados de mayor diversidad biológica de México, con más de 8,000 especies de plantas con flores identificadas, fue despojada de su manto vegetal original.

Las estrategias de desarrollo agropecuario emprendidas en la cuenca baja del Grijalva-Usumacinta plantearon dos requerimientos previos: el control de los ríos y el drenaje de las planicies costeras. Tales obras debían diseñarse para alcanzar objetivos múltiples: generar electricidad, controlar las inundaciones, suministrar aguas de riego y desecar las zonas pantanosas. El impulso a la agricultura de plantaciones y las agroindustrias favoreció el establecimiento de unos cuantos cultivos: caña de azúcar, coco, plátano, cacao y algunos cítricos en las planicies; café, frutales y hortalizas, en las cuencas altas. Inmediatamente estos cultivos predominaron en las zonas altas y en las áreas de riego y los distritos de temporal tecnificado de la región.

Sin embargo, varios factores operaron en contra de esta clase de agricultura: en el caso de las plantaciones de las tierras bajas, los métodos de riego por gravedad y la falta de mantenimiento de la infraestructura, significaron una baja eficiencia en la utilización del agua; las técnicas mecanizadas y de grandes requerimientos de agroquímicos (fertilizantes y plaguicidas) la hicieron energética y financieramente costosa; las aplicaciones inadecuadas de insumos (especialmente el abuso de plaguicidas), la falta de sistemas de control y la carencia de plantas de tratamiento de sus desechos la convirtieron en altamente peligrosa para los ecosistemas acuáticos; y, finalmente, su



hipersensibilidad a las fluctuaciones del mercado, la volvieron extremadamente frágil y riesgosa en términos de los plazos requeridos para la recuperación de sus inversiones.

El control de los ríos para regular avenidas y generar energía contempló la construcción de grandes presas en varios puntos de las cuencas altas. En una primera etapa, este programa se propuso el control y la regulación del sistema del río Grijalva. Allí se construyeron cuatro presas: La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas. De estas presas sólo La Angostura y Malpaso fueron diseñadas para regular avenidas y la capacidad de embalse de 11,400 Mm³. Estas trampas de azolve afectaron drásticamente el enorme potencial de acarreo de sedimentos y formación de suelos del sistema Grijalva. Su capacidad para inundar y fertilizar las llanuras costeras, los humedales, las lagunas y la rica zona litoral adyacente se vio bruscamente interrumpida. Los niveles de sólidos en suspensión descendieron drásticamente a prácticamente cero a partir de 1974. Estos desequilibrios se reflejaron pronto en los balances de la zona fluvio- marina y en la estabilidad del frente costero. La dinámica acción de las corrientes litorales, de los vientos y las tormentas tropicales prevalecieron sobre la acción compensadora de las descargas fluviales.

Playas y barreras arenosas han sufrido desde entonces intensos procesos erosivos y se encuentran en franco estado de regresión. El dominio de las aguas marinas propició la salinización de suelos y los cambios en el patrón de sedimentación se reflejaron en el descenso de ricas pesquerías litorales. Una multitud de efectos secundarios derivados de la violenta irrupción del capitalismo industrial en las sociedades rurales y de pescadores de la cuenca altera drásticamente el manto vegetal, permitiendo el arribo de nuevos colonos, compañías madereras y empresarios ganaderos, hacia las áreas no perturbadas de las selvas vírgenes o experimentaron crecimientos exponenciales

I.3.6. Uso del agua en la cuenca

Del volumen total de aguas superficiales que escurren anualmente en la región del Grijalva-Usumacinta (147 km³) se aprovechan para todos los usos el 34% (49.81 km³), de los cuales el 98.67% se utiliza para la generación de energía eléctrica (uso considerado como no consuntivo) y solamente el 1.33% se destina a usos consuntivos (agrícolas, público-urbanos, industriales y otros usos). Dentro de estos últimos, el de mayor demanda es el agrícola, seguido por el público-urbano. En general, la región tiene una demanda igual para usos consuntivos tanto de aguas subterráneas (0.67 km³/año), como de aguas superficiales (0.67 km³). En conjunto se tiene una extracción de 1.33 km³ de agua para usos consuntivos, lo que no llega siquiera al 1% de las disponibilidades totales.

I.3.7. Contaminación del agua en la cuenca

Las aguas superficiales presentan altos contenidos de sólidos disueltos y las aguas subterráneas son de las consideradas duras, esto es, con niveles elevados de sulfato y carbonato. A estas limitantes iniciales hay que agregarle las descargas de contaminantes domésticos e industriales sin tratamientos previos. Y algunos tramos del río Grijalva están afectados por las descargas de aguas negras no tratadas de poblaciones importantes como Tuxtla Gutiérrez y Villahermosa y de plantas industriales como las del



procesamiento de moscas para la erradicación del gusano barrenador del ganado. Los mayores problemas de deterioro de la calidad del agua se observan entre las presas de La Angostura y Chicoasén, afectada por algunas de las descargas mencionadas.

Los ingenios azucareros, las industrias alimenticias y la industria petrolera aportan una cantidad considerable de contaminantes al sistema hidrológico regional. El problema es que un alto número de descargas no son registradas y aforadas, por lo que los datos sobre los volúmenes y la calidad de las mismas son inconsistentes y erráticos. Pero, en general, la infraestructura de tratamiento y vertido de aguas residuales en la región es insuficiente e ineficiente. El hecho es que ninguna planta de tratamiento tanto municipal como industrial cumple en la actualidad con las normas de descarga. Algunos datos revelan la magnitud y la gravedad de esta situación. En el caso de Pemex, la industria consumidora de los mayores volúmenes de aguas superficiales y subterráneas y que aporta mayores descargas de aguas residuales a los sistemas acuáticos de la región, ha visto incrementar exponencialmente sus volúmenes derramados al ambiente por fugas.

I.4. Entorno Social

I.4.1. Situación de la población en la región Grijalva- Usumacinta

Con todas sus riquezas naturales, la población de la región del Grijalva-Usumacinta es la más pobre y marginada de México de acuerdo con los criterios oficiales de pobreza y marginación, que excluyen a sus habitantes de los beneficios de la modernización. La región cuenta con 4.9 millones de habitantes y con una densidad de 54 hab/km², superior a la media nacional, que es de 50 hab/km². Se trata de una población mayoritaria rural (58%) dispersa en 15,153 comunidades rurales (menores de 2,500 hab.); el 26% vive en 147 localidades urbanas medias (entre 2,500 y 49,999 hab.) y el 16% restante se concentra en cuatro grandes ciudades (San Cristóbal de Las Casas y Tuxtla Gutiérrez en Chiapas; Villahermosa y Cárdenas en Tabasco). Entre 1970 y 1995 esta población se duplicó y para el año 2020 se espera que se duplique otra vez, merced a la combinación de factores demográficos —altas tasas de natalidad (43 por mil, la más alta del país y descenso de las tasas de mortalidad: 4 por cada mil hab.)— que se reflejaron en tasas de crecimiento superiores a las de la población nacional. En los últimos 25 años esta tasa de crecimiento ha sido de 3.52%, la más alta a nivel nacional para un periodo similar.

La mayoría de esta población no cuenta con los satisfactores mínimos que les permita una existencia sana y digna. Según las cifras del INEGI de 1995 y del XII Censo General de Población y Vivienda, 2000 el 26% de las viviendas de la región carece de agua potable y el 35% no cuenta con drenaje.

El panorama social de la región se caracteriza por sus grandes contrastes que nos ofrece la cuenca es de pobreza y marginación, excepto la planicie costera de Tabasco y la depresión central de Chiapas donde se ubican las más grandes concentraciones urbanas. En el Alto Grijalva, 37 de sus 47 municipios presentan grados altos y muy altos de marginalidad. En el Bajo Grijalva, 30 de sus 40 municipios se encuentran en una situación similar. Lo mismo puede decirse de la subregión del Usumacinta donde 12 de sus 17



municipios padecen esta situación de miseria y atraso. Esto hace de la cuenca del Grijalva-Usumacinta la región de más alta marginalidad social de la República.

I.4.2. Secuelas de la modernización en la cuenca Grijalva- Usumacinta

Los costos de la modernización de la sociedad mexicana han sido cargados sistemáticamente a las poblaciones rurales y en especial a los pueblos indígenas de la región. Sin embargo, la degradación de los ecosistemas de la cuenca y la destrucción de sus acervos culturales son los resultados de decisiones que les han sido por completo ajenas. Ellos no han promovido la tala de sus bosques ni se han beneficiado de las ganancias millonarias del tráfico de la madera. No han gozado de las fortunas que trajo el establecimiento de la ganadería. No han alterado sus fértiles planicies de inundación para establecer cultivos comerciales de exportación, cuyas utilidades nunca los han beneficiado. No han destruido sus lagunas costeras y estuarios para establecer puertos industriales exportadores de hidrocarburos ni contaminado sus ecosistemas acuáticos con toda clase de sustancias tóxicas. Nada han tenido que ver con los megaproyectos que han destruido sus recursos. Estas estrategias les han sido impuestas bajo toda clase de decisiones autoritarias, en nombre de la civilización, el progreso, la industrialización, la modernización y ahora el desarrollo sustentable.

I.5. Generalidades del sistema hidroeléctrico Grijalva

I.5.1. Características principales

La región sureste del país constituye la zona de mayor potencial hidroeléctrico dado que en ella se localiza el Sistema Hidrogeográfico Grijalva - Usumacinta que aporta el 30% de los recursos hidrológicos de México. La cuenca de este río se inicia en la vecina República de Guatemala, se interioriza a nuestro país en la región denominada "Alto Grijalva" en el Estado de Chiapas y desciende posteriormente hacia la planicie del Estado de Tabasco, conocida con el nombre de "Bajo Grijalva", que abarca desde la Zona de la Chontalpa hasta la desembocadura en el Golfo de México. En México, el Río Grijalva es la segunda corriente en importancia en cuanto a escurrimiento, con un volumen medio anual de 30,000 millones de m³; cerca de su desembocadura se une con el Río Usumacinta, el principal río de México. El escurrimiento medio anual de ambos es, en promedio, de 98,700 millones de m³. El Río Grijalva drena fundamentalmente la parte alta del Estado de Chiapas, y en la cuenca baja se bifurca en el Río Samaria y en el Río Carrizales. El Río Usumacinta drena la parte alta del Estado de Tabasco, así como de Guatemala, y ambos se unen en la desembocadura con varias corrientes que cruzan la Ciudad de Villahermosa, Capital del Estado de Tabasco.

La capacidad instalada de todo el complejo es de 4,800 MW, esto representa, uno de los más grandes soportes del Sistema Interconectado Nacional (SIN), y a su vez la capacidad de embalse más grande del país con 36,373 millones de m³. Los cuatro aprovechamientos del Complejo, contribuyen al SIN con una generación anual aproximada de 12,500 millones de kW y un caudal promedio anual de 800 m³/s.



I.5.2. C.H. La Angostura

La central hidroeléctrica La Angostura se localiza sobre el kilómetro 62 de la carretera que va de Tuxtla Gutiérrez al poblado denominado Venustiano Carranza. Su vaso de almacenamiento regulariza en promedio el escurrimiento de 9,700 millones de m³ anuales.

Cuenta con un embalse de 19,736 millones de m³, el NAME se encuentra en la elevación 538.2 msnm, el NAMO a 533 msnm y el NAMINO a 500 msnm. La cortina es del tipo enrocamiento, con una altura de 147 m, elevación de desplante de 396 msnm, elevación de la corona de 543 msnm; cuenta con dos vertedores y 6 compuertas las cuales tienen una capacidad máxima de descarga de 8,800 m³/s.

I.5.3. C.H. Chicoasén

La central hidroeléctrica Chicoasén se encuentra ubicada en el kilómetro 40 de la carretera Tuxtla Gutiérrez al poblado de Chicoasén. Cuenta con un embalse de 1,443 millones de m³, el NAME se encuentra en la elevación 395 msnm, el NAMO a 392 msnm y el NAMINO a 380 msnm. La cortina es del tipo enrocamiento, con una altura de 262 m, elevación de desplante de 140 msnm, elevación de la corona de 402 msnm; cuenta con túneles vertedores y 3 compuertas por túnel, tienen una capacidad máxima de descarga de 15,000 m³/s.

I.5.4. C.H. Malpaso

La central hidroeléctrica Malpaso se localiza sobre el kilómetro 80 de la carretera que va de Tuxtla Gutiérrez al poblado denominado Raudales Malpaso, municipio de Tecpatán. Cuenta con un embalse de 14,056 millones de m³, el NAME se encuentra en la elevación 188 msnm, el NAMO a 182.5 msnm y el NAMINO a 144 msnm. La cortina es del tipo enrocamiento, con una altura de 137.5 m, elevación de desplante de 54.5 msnm, elevación de la corona de 192 msnm; cuenta con dos vertedores, uno de servicio y otro de emergencia y 4 compuertas radiales con capacidad máxima de descarga de 10,650 m³/s.

I.5.5. C.H. Peñitas

La central hidroeléctrica Peñitas se localiza sobre el kilómetro 28.5 de la carretera Chontalpa- Malpaso, municipio de Ostucán, Chiapas. Cuenta con un embalse de 1,137 millones de m³, el NAME se encuentra en la elevación 95.5 msnm, el NAMO a 87.4 msnm y el NAMINO a 850 msnm. La cortina es del tipo enrocamiento, con una altura de 53 m, elevación de la corona de 98 msnm; cuenta vertedor con dos canales y 4 compuertas las cuales tienen una capacidad máxima de descarga de 18,700 m³/s.

Las presas de gravedad se caracterizan por ser estables aún en cimentaciones sobre roca de pobre calidad. Las presas de arco, fallan muy rápido cuando su cimentación falla, aunque los arcos por si mismos son estructuras muy resistentes. Las presas que dependen de contrafuertes, tales como las de losas y arcos múltiples, se pueden



desintegrar en secuencia, como una fila de fichas de dominó. Las presas de tierra y enrocamiento como las construidas en el Sistema Hidrológico Grijalva, tienden a fallar mas lentamente, pero son obviamente más susceptibles a la erosión interna y externa que las de concreto o mampostería.

I.5.6. Antecedentes de inundaciones en la planicie costera de Tabasco y Chiapas

Durante los meses de mayo a noviembre el Golfo de México se ve influenciado por la presencia de sistemas meteorológicos, tales como huracanes y ondas tropicales. Adicionalmente a partir de septiembre empiezan a incidir sobre el territorio del sureste los frentes fríos (masas de aire polar). En octubre de 1999 las lluvias acumuladas durante el mes en las cuencas de los ríos Grijalva y Usumacinta fueron del orden de 50 cm, las cuales se concentraron en la planicie tabasqueña. En Chiapas la precipitación media en todo el mes fue de 34 cm y en Tabasco de 65 cm. Esas lluvias representaron una y media veces lo normal en Chiapas y casi dos veces lo normal en Tabasco. La consecuencia fue la ocurrencia de importantes inundaciones en la planicie costera de Tabasco.

I.6. Conclusión capitular

En la cuenca del Grijalva-Usumacinta se concentra el 30% de los escurrimientos de los ríos de México (147 km^3 /año) convirtiendo a este enorme hidrosistema ecológico en el almacén de la más alta biodiversidad conocida de México. Los ríos y lagunas alcanzan sus máximos nieles entre septiembre y noviembre.

CAPÍTULO 2 ANÁLISIS DEL DESLIZAMIENTO

2.1 Introducción capitular

Después de tres días de intensas lluvias el 4 de noviembre de 2007 ocurrió un deslizamiento sobre el Río Grijalva, obstruyendo el cauce con un tapón de aproximadamente 15 millones de m³ de material y poniendo en riesgo los asentamientos humanos por la posible ocurrencia de inundaciones.

2.2 Deslizamiento sobre el río Grijalva

El domingo 4 de noviembre de 2007, aproximadamente a las 20:30 horas y después de tres días de intensas lluvias en el sureste mexicano, ocurrió un deslizamiento en la ladera derecha del Río Grijalva, Estado de Chiapas, entre las presas de Peñitas y Malpaso. Este fenómeno geológico ocasionó que se obstruyera el cauce del río y se formara una ola de unos 50 m de altura que arrasó con el poblado Juan del Grijalva municipio de Ostucán, Chis., que se localizaba inmediatamente aguas arriba del deslizamiento y la pérdida de vidas humanas; por la magnitud del movimiento de tierra es muy probable que sea el más importante ocurrido en México. La obstrucción del cauce formó un tapón de aproximadamente 800 m de largo y 120 m de altura, en el embalse de la Presa Peñitas, impidiendo el flujo proveniente de aguas arriba de la Presa Malpaso del Complejo Hidroeléctrico Grijalva.



Fig. 1. Localización del deslizamiento sobre el río Grijalva.

Como consecuencia del deslizamiento, la Comisión Federal de Electricidad detuvo la generación en las dos centrales y los niveles de agua aumentaron gradualmente a una velocidad de 10 cm/día en los respectivos embalses. Se midió una diferencia de cotas de aproximadamente 2 m entre el embalse de aguas arriba y aguas abajo de Peñitas; la elevación del nivel del agua ponía en riesgo a las poblaciones asentadas aguas arriba del tapón y de la presa Malpaso. Por lo anterior, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), emitieron una declaratoria de emergencia en conjunto, apoyados por Petróleos Mexicanos (PEMEX), Ejército Mexicano, los Gobiernos de los estados de Tabasco y Chiapas y diversas empresas constructoras.



En la historia del mundo y de nuestro país, han existido a lo largo del tiempo geológico, un sin número de deslizamientos de tierra, este es un fenómeno geológico que pudiéramos calificar como común, incluso son la principal causa de pérdidas humanas y daños materiales atribuidos a desastres naturales en el mundo.

Sin embargo, en nuestro país, lo ocurrido en Juan del Grijalva es un fenómeno que sale de lo convencional principalmente por tres razones, primera el aspecto social, ya que al interrumpir el flujo de uno de los ríos más caudalosos del país puso en riesgo los asentamientos humanos ubicados aguas arriba y aguas abajo del tapón debido a la posible ocurrencia de inundaciones; segunda el aspecto económico, ya que imposibilitó la operación normal de las centrales hidroeléctricas Netzhualcoyotl (Malpaso) y Ángel Albino Corzo (Peñitas) y finalmente, por la magnitud del deslizamiento que se calcula en más de 55 millones de m³.

El deslizamiento se presentó en una zona del río ubicada entre dos presas, a 12 km de Peñitas y a 30 km de Malpaso, este hecho fortuito representó una circunstancia favorable para el manejo de la contingencia, ya que permitió controlar el flujo tanto aguas arriba, como aguas abajo del tapón y en la misma medida se redujo considerablemente el riesgo de un destaponamiento súbito o inundaciones masivas. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) fue designada para coordinar los trabajos para remover la obstrucción y normalizar el flujo de agua a través del río. Para la ejecución de esa encomienda y dada la gravedad y urgencia de la situación la CFE movilizó personal de prácticamente todas sus áreas, con el fin de integrar un equipo interdisciplinario que respondiera oportunamente a la sociedad, dentro del contexto de una de las más graves inundaciones de la ciudad de Villahermosa en su historia reciente.

2.2.1 Geología regional

La zona está comprendida entre la Presa de Malpaso al SW y la Presa de Peñitas al N, ambas sobre el Río Grijalva, el Sinclinal Malpaso al W y el Anticlinal la Unión al E, territorio contenido en lo que se conoce como las provincias fisiográficas montañas del norte y la planicie costera del golfo; para el presente estudio, el área se sitúa en las zonas aledañas al embalse de la C.H. Peñitas, desde la cortina hasta unos 5 km al sur del poblado Rómulo Calzada. La zona se caracteriza por una serie de sierras y valles, lo mismo se observan lomas redondeadas no muy inclinadas, como sierras coronadas por escarpes verticales que hacen visible a la distancia, la estratificación de las rocas.

2.2.2 Estratigrafía

Estratigráficamente la zona está formada por rocas sedimentarias cuya edad se ubica en la parte media y superior del terciario, específicamente del Eoceno - Mioceno. Las rocas más jóvenes de la región son unas lutitas limosas blandas de color pardo claro, estratificadas en capas que varían de 10 a 30 cm que hacia abajo se vuelven más arcillosas y presentan una fractura concoidal, son de color gris oscuro y tienen una mayor compacidad y dureza que las anteriores, presentan estratos que varían desde unos 20 cm hasta un metro de espesor y se encuentran intercaladas con capas de arcilla franca y expansiva. En la figura se muestra una columna estratigráfica ampliada, ya que incluye

las formaciones cretácicas y terciarias, que afloran entre las presas Peñitas y Malpaso, en ella se señala lo que corresponde al entorno de la C.H. Peñitas y su embalse.

Con base en exploraciones petroleras directas e indirectas, realizadas en la zona, la secuencia de lutitas y areniscas, agrupadas y descritas localmente en diversas formaciones del Eoceno – Mioceno, tiene un espesor que supera los 2,000 m. Por otra parte, aparecen en diferentes niveles de la columna estratigráfica, un cuerpo de conglomerados formados por clastos redondeados de 10 a 15 cm de tamaño, empacados en una matriz arcillosa. Con base en los levantamientos geológicos realizados en la zona entre el deslizamiento y la Presa de Peñitas, los afloramientos de rocas se consideran de la Formación Sunuapa, del Mioceno.

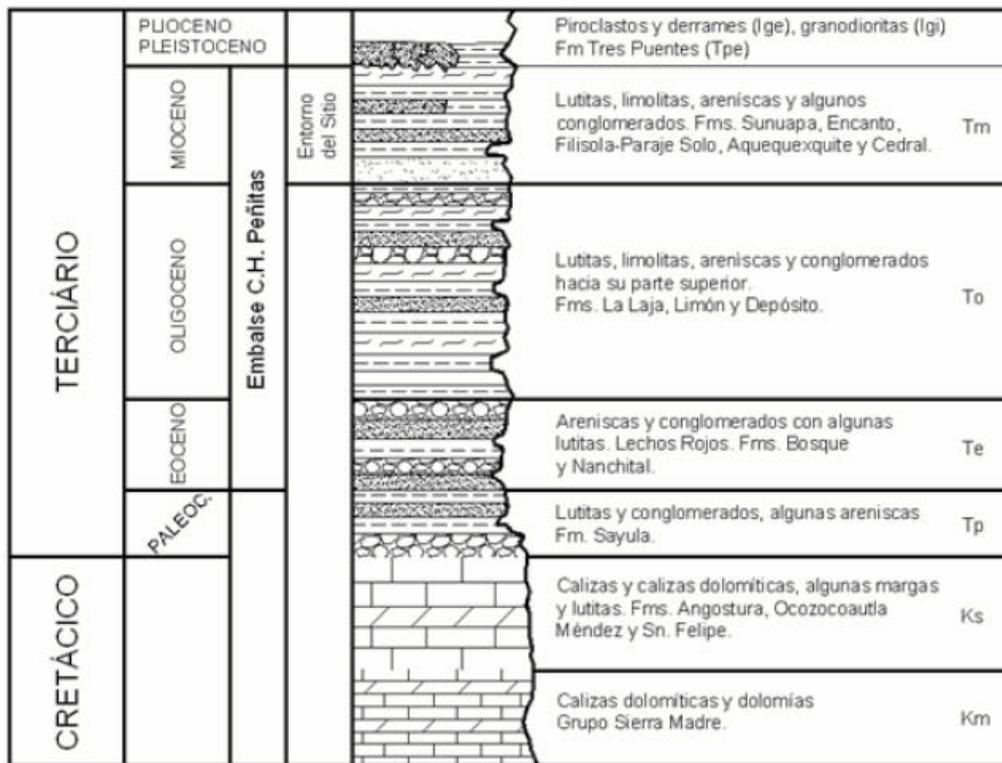


Fig. 2. Estratigrafía ampliada de la zona de estudio.

Aunque fuera de la zona de estudio para este trabajo, pero por su importancia, cabe mencionar la presencia del volcán Chichonal a unos cuantos kilómetros al este de Juan del Grijalva, cuya última erupción en el año de 1982, esparció una gran cantidad de cenizas en la región. Sin embargo, es importante mencionar que en la región se encontraron evidencias, a la luz de lo ocurrido en Juan del Grijalva, de que el fenómeno se había manifestado en tiempos no antropológicos, con deslizamientos de menor magnitud al citado. Por esta razón, se llevó a efecto una campaña de reconocimiento a lo largo del vaso de la presa Peñitas, para localizar sitios con la misma condición de capas inclinadas (aunque suavemente), hacia el cañón del río y posibles discontinuidades que enmarquen zonas potencialmente inestables.

2.2.3 Fallas

El área de estudio se localiza en el borde noreste del eje del sinclinal Maspac, ésta es una estructura regional producto de la deformación de la Orogenia Chiapaneca, donde superficialmente, existe amplios plegamientos en los sedimentos terrígenos del Mioceno y Eoceno, cortados por un sistema de fallas de desplazamiento lateral de rumbo noreste. Particularmente la zona del caído, se encuentra limitada tanto en la parte norte como en la sur, por un par de fallas de desplazamiento lateral, las cuales son paralelas entre si y conservan un rumbo NE 60° SW. Hacia la parte noreste el bloque esta segmentado por la falla La Laja, la cual es una falla regional del tipo normal.

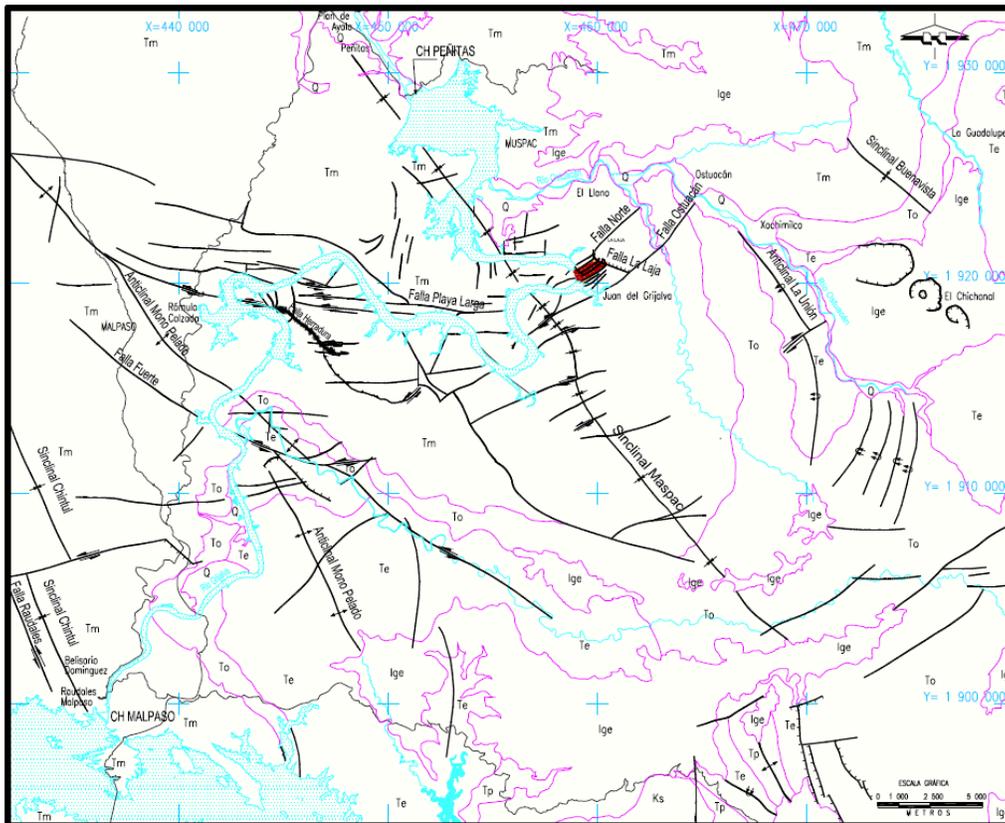


Fig. 3. Fallas en la zona del caído.

2.2.4 Fracturamiento

La mayoría de las fracturas presentan óxidos de hierro en su plano, evidenciando la circulación de agua meteórica entre planos de fracturamiento. Se tienen tres familias de fracturamiento, con las siguientes características:

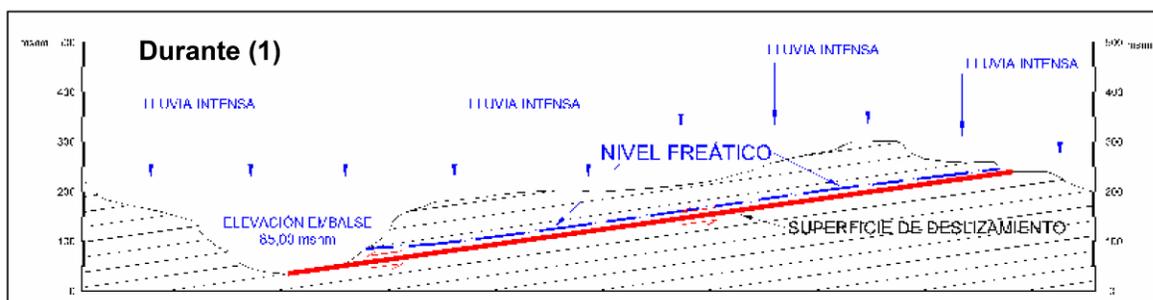
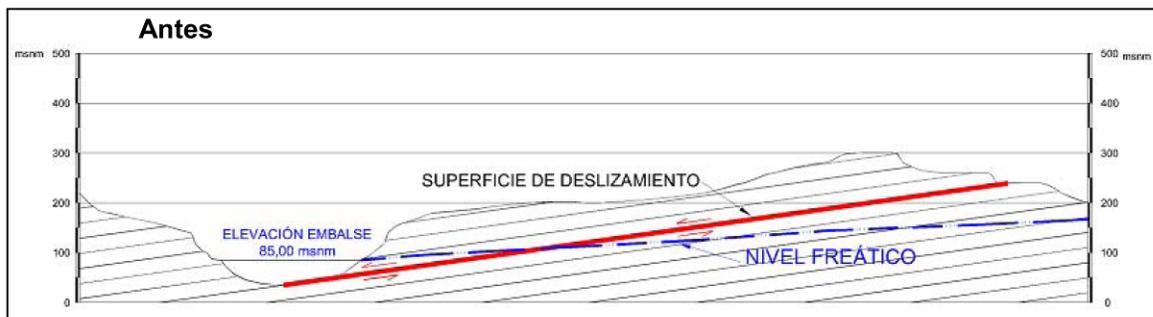
- 1) N 60° E/ 75° NW y SE, esta es el principal sistema de discontinuidades y se caracteriza por ser fracturas continuas (de 3 a 10 m), de superficie plana y con escaso relleno de calcita, este sistema es paralelo a las fallas de desplazamiento lateral.



- 2) N 45° W/ 80° NE.- sistema secundario de fracturamiento, de menor continuidad (de 1 a 3 m), presenta superficie plana-rugosa, sin relleno y es ortogonal al primer sistema.
- 3) E-W/ 85° N.- este sistema es poco continuo, de superficie plana-lisa y es cortado preferentemente por el sistema de fracturamiento N 60° E.

2.3 Mecanismo de falla

Dos tipos de fenómenos causaron el deslizamiento de Juan del Grijalva, uno de carácter geológico, que tiene que ver con aspectos litológicos y estructurales, y otro meteorológico, relacionado con una precipitación intensa que alcanzó los 1000 mm, entre los días 28 de octubre al 3 de noviembre de 2007, lo que provocó variaciones en el nivel freático de la masa rocosa y con ello, subpresiones (presiones ascendentes que contrarrestan el efecto gravitatorio del macizo). En el aspecto geológico un fenómeno que comenzó a gestarse tal vez hace miles de años, el cual se refiere a la inestabilidad propia del paquete sedimentario deslizado, con inclinación hacia el cañón del Río Grijalva y que ya había sufrido algún desplazamiento. Por otra parte se relaciona con el desplome de la costilla topográfica que funcionaba como parteaguas en la parte posterior del caído y que coincide con el trazo de la falla de La Laja, suscitada también con antelación a este evento, sin que haya registro de su ocurrencia. Posteriormente la intensa lluvia saturó el terreno, y el nivel freático sufrió ascensos y descensos en la masa rocosa, lo que provocó un efecto de empuje de subpresión en la capa blanda de lutita, permitiendo que el bloque se deslizara como si fuera una barra de hielo aprovechando el debilitamiento de los bordes sur y norte del área, asociados a fallas de deslizamiento lateral que al fallar el bloque, dejó huellas o cicatrices muy lineales en los bordes laterales del deslizamiento.



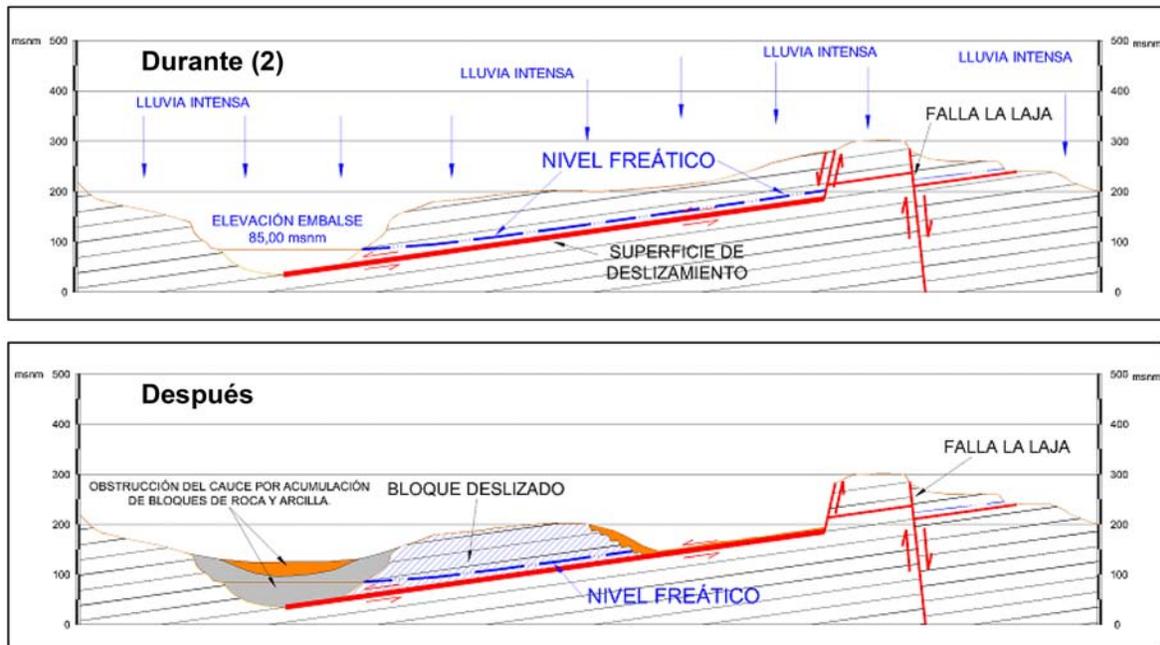


Fig. 4. Mecanismo de falla.

La proyección del plano de falla o superficie de deslizamiento en el antiguo cauce del río es a la elevación 60 m, prácticamente en el lecho del río, por lo que al desplazarse el bloque, el movimiento continuó por la margen izquierda y arrastró parte de los materiales del cauce (aluvión).

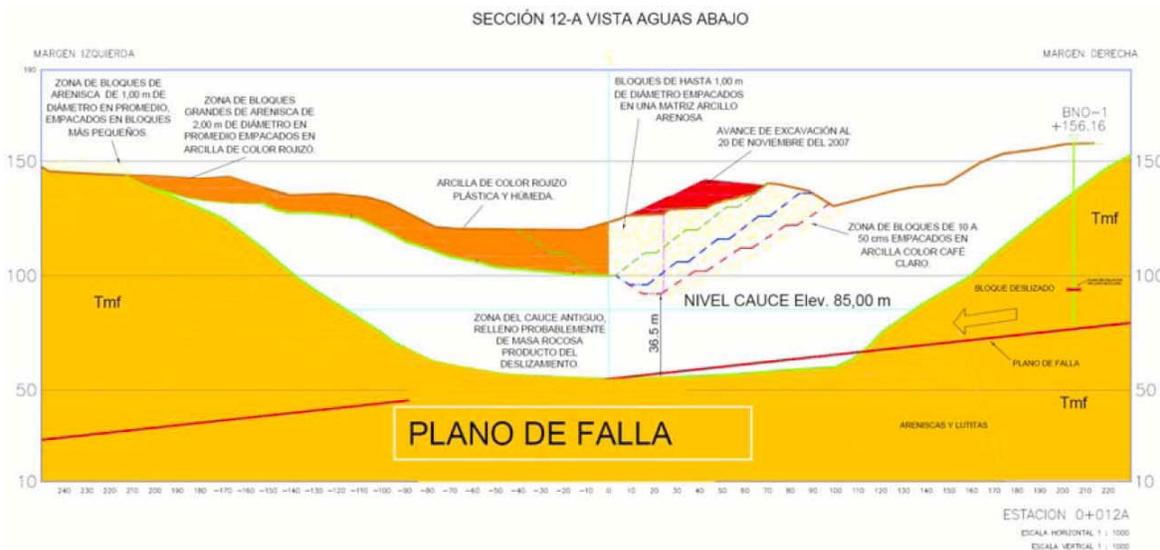


Fig. 5. Plano de falla, vista hacia aguas abajo.

De manera casi simultánea a que el bloque se moviera y separara, a través de las fallas de deslizamiento lateral que lo limitaban, el gran bloque se dividió en tres sub-bloques

cuyos límites son también fallas pre-existentes similares a las primeras. El sub-bloque I es el que se ubica más aguas abajo, el II en medio y el III hacia aguas arriba.

Estos bloques tuvieron dinámicas diferentes, es decir, unos se deslizaron más que otros, debido a la diferente resistencia encontrada. De esta forma, los sub-bloques I y III se movieron más, porque encontraron menor resistencia que el sub-bloque II, que se detuvo al detenerse con la margen izquierda. Después de que el movimiento del bloque cesó, es decir al encontrar el contrafuerte que lo detuvo, el bloque se relajó y se verificaron una serie de fallas paralelas al antiguo cauce y se verificaron otras menores de relajación transversales a estas últimas.

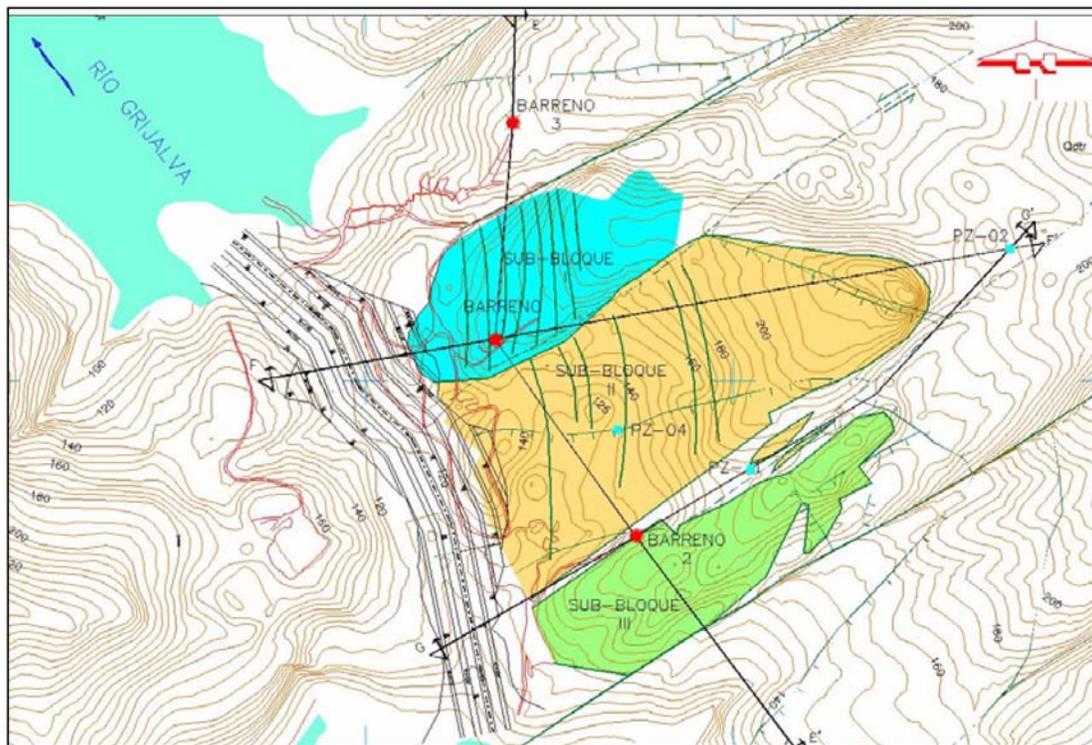


Fig. 6. Bloque deslizado.

Este mecanismo de falla, generó en el cauce del río, un tapón (de 15 millones de m^3 en el cauce de un total de 55 millones de m^3 desplazados) y el desplazamiento súbito de una gran masa de agua, la cual se manifestó como una ola gigante que arrasó con el poblado de Juan de Grijalva, Chiapas.

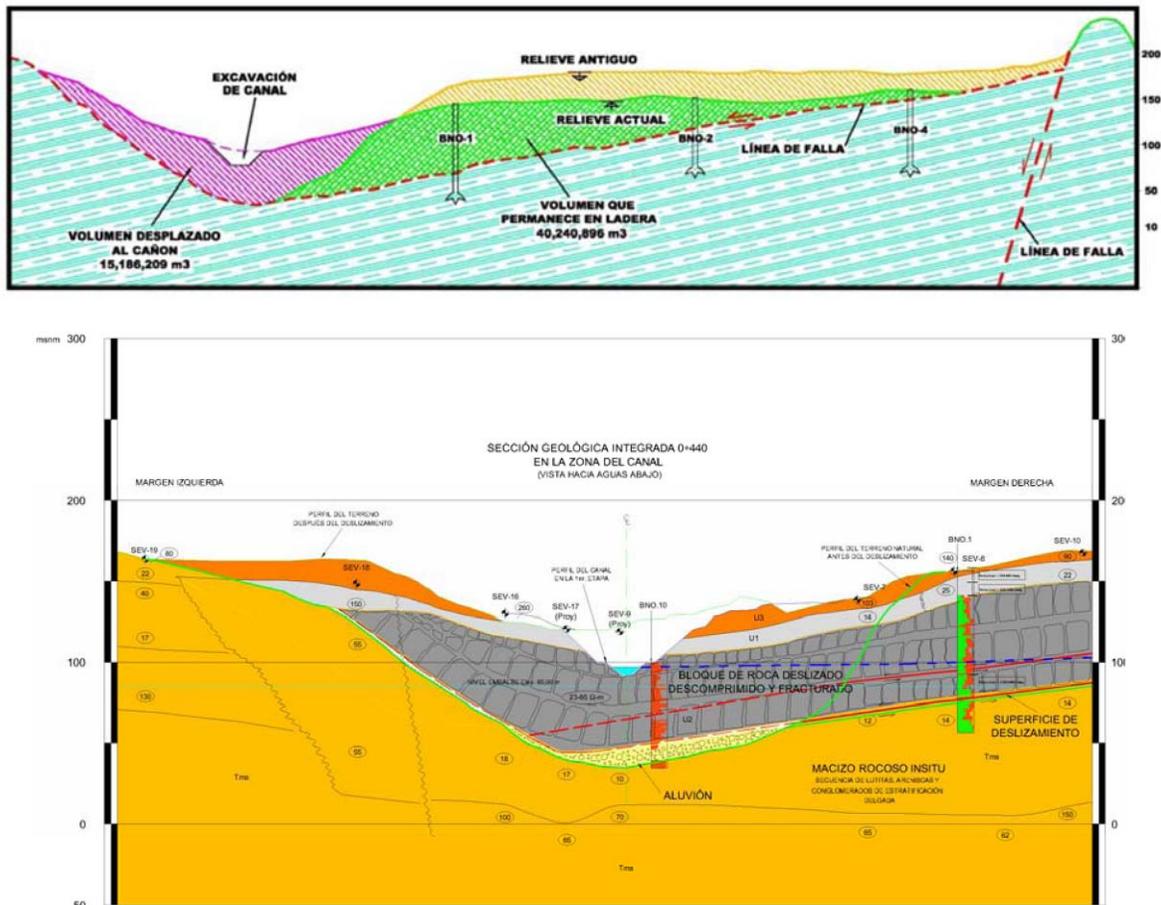


Fig. 7. Tapón sobre el río Grijalva.

2.4 Causas de la falla

De estudios geológicos realizados para el proyecto Peñitas, se sabía que la estratigrafía de la zona está constituida por secuencias de estratos de lutitas y areniscas de espesor y resistencia variables hasta profundidades de más de 2,000 m. Adicionalmente, la información topográfica existente reveló que la zona presentaba márgenes casi verticales con alturas de más de 90 m, y que a partir de allí el terreno suaviza su topografía, presentando pendientes del orden de los 10° . La falla ocurrió sobre un estrato de lutita muy alterada con un echado del orden de 8 a 10° buzando hacia el río y ubicada a profundidades del orden de 60-80 m.

Con esta información se construyó un modelo geotécnico preliminar que aparece en la figura 8 y que sirvió de base para realizar el análisis.

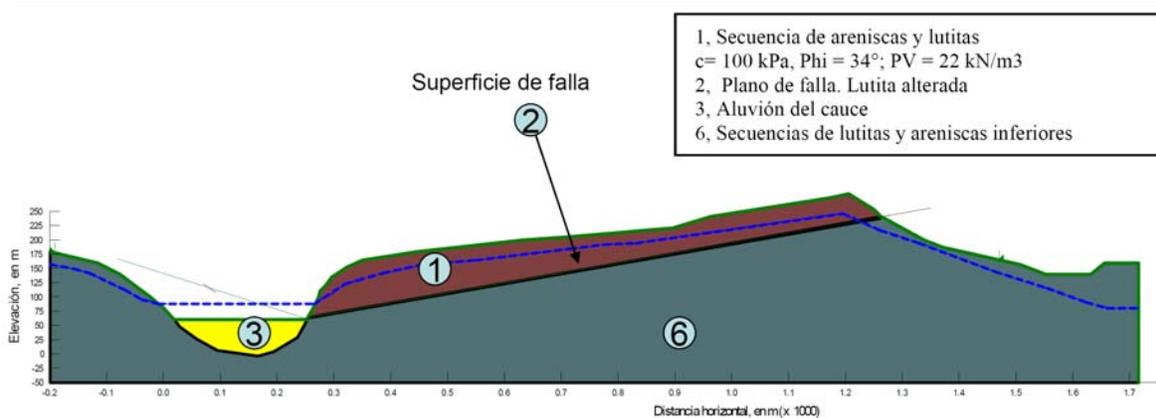


Fig. 8. Estratigrafía en la zona de falla.

Los resultados indicaron que para un nivel freático bajo la lutita tendría que tener un ángulo de fricción (f) menor que 10° ; para un NAF a una elevación intermedia el f sería de 12.9° y para una NAF alto (a la elevación de la superficie) el f sería de 15.6° .

Puesto que el deslizamiento ocurrió después de cinco días de lluvias intensas es lógico pensar que el NAF tendría que haber estado a niveles bastante altos, probablemente cercanos a la superficie, por lo que consideraron que un valor de f del orden de 15 a 16° era bastante representativo de los materiales observados.

Con esta información, se propuso que la falla ocurrió de la siguiente manera:

1. Previo al periodo de lluvias intensas la ladera se encontraba con factores de seguridad (FS) mayores que 1.5.
2. Después de cinco días de lluvias intensas el NAF se elevó hasta muy cerca de la superficie en toda la ladera.
3. A partir de allí comenzó un deslizamiento lento (creep).
4. Una vez que se alcanzó deformaciones importantes la resistencia del plano de falla (lutita alterada) se redujo desde su resistencia pico a su resistencia residual, lo que provocó que el movimiento se acelerara.
5. Esto hizo que más de 55 millones de m^3 se deslizarán a través del plano de falla una distancia horizontal de 500 m y una distancia vertical de cerca de 140 m.

Exploración geológica

Los barrenos exploratorios perforado, tuvieron la finalidad de definir el modelo geológico del sitio, caracterizando la masa rocosa del bloque deslizado in situ, así como la zona de falla, la cual consiste en un estrato de arcilla plástica y húmeda, de color gris oscuro, de un metro de espesor en promedio. En cada uno de los barrenos se efectuó una descripción litológica detallada, su recuperación e índice de calidad de roca, determinándose en todos los casos, que en el bloque deslizado, la recuperación fue baja; sin embargo, pasando al bloque in situ (que no tuvo movimiento), la recuperación e índice de calidad de roca, mejoraron notablemente e incluso en algunos casos alcanzando casi

un R.Q.D del 100% , indicativo de ser una roca de buena calidad, no obstante por tratarse de una secuencia de lutitas, areniscas arcillosas y limolitas, se consideró como una roca blanda, poco resistente y de escasa compacidad. En todos los casos se cortó el plano de falla, concluyendo que éste es un plano continuo, con buzamiento de 8° hacia el SW y es concordante con la estratificación general.



a) Un día antes del deslizamiento.
(3 de noviembre 2007)



b) Un día después del deslizamiento.
(5 de noviembre 2007)



c) Recanalización del río en su primera etapa.
(19 de diciembre 2007).



d) Aspecto actual.

Fig. 9. Canal Juan de Grijalva, Chiapas.

2.5 Conclusión capitular

Dos tipos de fenómenos causaron el deslizamiento de Juan del Grijalva, uno de carácter geológico, referente a los aspectos litológicos y estructurales, y otro meteorológico, asociado a una precipitación intensa que alcanzó los 1000 mm, entre los días 28 de octubre al 3 de noviembre de 2007, lo que provocó variaciones en el nivel freático de la masa rocosa y con ello, subpresiones en la capa blanda de lutita permitiendo que el bloque se deslizara aprovechando el debilitamiento de los bordes sur y norte del área, asociados a las fallas existentes.



Los análisis indicaron que el factor de estabilidad de la masa deslizada era mayor que 1.9 aún para condiciones de NAF alto, y que aún excavando el canal el FS seguía siendo mayor que 1.5. Para definir los taludes del canal primeramente se consideró que la masa deslizada estaba fuertemente fracturada y había perdido totalmente su estructura, lo que llevó a recomendar un canal con taludes 2:1 (H:V) con bermas de 5 m de ancho a cada 10 m de altura. Con esta sección se buscó un trazo que diera el menor volumen de excavación posible.

Posteriormente, el avance de la excavación mostró que bajo una capa de suelo residual del orden de 15 m de espesor se encontraba la roca original fuertemente fracturada pero aún conservando buena parte de su estructura, lo que le daba una unión importante.

Después de analizar la problemática del río obstruido y las implicaciones de lluvias inminentes en los meses de noviembre y diciembre se optó por construir, en una primera etapa, un canal de 800 m de largo con una sección trapecial de 6 m en su base, 80 m en promedio en su parte superior y una profundidad promedio de 28 m, desplantado sobre la cota 92 msnm.

Este canal permitiría el paso de avenidas extraordinarias en caso de que se presentaran y posteriormente se ampliaría en una segunda etapa con las dimensiones necesarias para permitir el flujo normal del caudal que transita por el río Grijalva. Durante la primera etapa que abarcó desde el 5 de noviembre al 31 de diciembre (57 días) se trabajaron las 24 horas ininterrumpidamente.

El esfuerzo realizado, la planeación y coordinación de los trabajos de la excavación en tres frentes, permitió llegar a la cota 92 y remover más de un 1200 mil m³ de arcilla y roca en bloques medianos a grandes, logrando la abertura del tapón el 18 de diciembre de 2007.

Una vez que se consiguió este objetivo, la segunda etapa se enfocó en ampliar la capacidad del canal y en incrementar la estabilidad de sus márgenes, para lo cual se decidió profundizar el piso del canal hasta la elevación +85.0, con un ancho de plantilla de 70 m, y tender sus taludes a valores de 1:1 (H: V). En algunos tramos del canal fue necesario dejar taludes más abruptos, tratando de evitar que el volumen de excavación se incrementara demasiado. Para poder excavar en seco al nuevo nivel de plantilla de +85.0 fue necesario construir una ataguía aguas arriba. En marzo de 2008, una vez alcanzado la elevación del proyecto, se realizó la reapertura del canal, a través del cual pasó gastos superiores a los 2000 m³/s que produjeron socavación de su fondo y erosión lateral de sus márgenes.

Lo anterior provocó algunas fallas locales en las márgenes del canal, lo que obligó a un nuevo proyecto de estabilización, el cual consistió en el abatimiento de sus taludes en varias etapas. Durante los trabajos de ampliación, como el canal se encontraba en operación, dificultó la extracción de material al cortar por debajo del nivel del cauce, por lo se construyó una ataguía y pre-ataguía aguas arriba del canal, cerrando así temporalmente el flujo del río, para poder trabajar en seco, llegando hasta la cota y ancho indicados en el proyecto.



Posteriormente, en mayo de 2008 se realizó una batimetría del canal para revisar los niveles de socavación de su fondo y de erosión lateral de sus paredes. Los resultados indicaron socavaciones del orden de 5-6 m que indudablemente afectaban la estabilidad general de la ladera de margen derecha del canal, por lo que fue necesario realizar un análisis para evaluar su estabilidad.

3.3 Geología del canal

Para caracterizar los materiales que taponaron el cauce del río Grijalva, donde se excavó el canal, se realizó un levantamiento geológico superficial con objeto de diferenciar las diversas unidades litológicas en la zona y realizar la vigilancia del comportamiento de la excavación de las bermas y taludes, para ello se agruparon en tres unidades de acuerdo a la siguiente tabla:

UNIDAD	DESCRIPCIÓN
U1	Acumulación de bloques de areniscas y lutitas de forma tabular e irregular con tamaños promedio de 3 a 10 m de diámetro, con escasa arcilla entre ellos.
U2	Zona de bloques de lutita y arenisca de forma tabular e irregular con tamaño menor a 3 m de diámetro. Esta unidad representa el bloque deslizado, ya que conserva la estructura original de la masa rocosa.
U3	Zona de acumulación de arcilla color rojo, conteniendo bloques de lutita y arenisca, intemperizados, de color pardo en tamaños de 0,40 a 2,0 m

Este criterio se limitó a establecer la distribución de materiales en la parte superficial, sin considerar su continuidad a profundidad. Por otra parte, con el apoyo de la brigada de topografía se efectuó una configuración de detalle en la zona del tapón y se elaboraron secciones topográficas a cada 20 m, que sirvieron de base para formar las primeras secciones geológicas del tapón, lo que permitió ir ajustando el trazo del canal con objeto de realizar una menor excavación.

Cabe destacar que con ese fin, el trazo del eje del canal, varió al menos siete veces, es por ello que este cuenta con varias deflexiones, finalmente, su longitud se estimó en 760 m. Se programaron tres fases de excavación, para lo cual se llevó a efecto la configuración topográfica de detalle del trazo y seccionamiento a cada 20 m. En la primera fase se levantó un eje a la elevación 110 msnm, sobre el trazo del canal, para posteriormente iniciar los cortes con una pendiente de 1,5:1 los cuales fueron modificados dependiendo de las características de los materiales de cada tramo.

Se llevó a cabo un pronóstico de fechas clave para la excavación de los diferentes niveles, con base en los volúmenes de excavación y con diferentes rendimientos diarios, que se muestran en la Tabla.

Niveles de excavación	Volumen m ³	35000 m ³ /día	30000 m ³ /día	25000 m ³ /día	20000 m ³ /día
110	380080	26 nov	28 nov	29 nov	1 dic
100	507680	30 nov	2 dic	4 dic	8 dic
96	848271	10 dic	13 dic	18 dic	24 dic
92	1217561	20 dic	27 dic	01 ene	12 ene

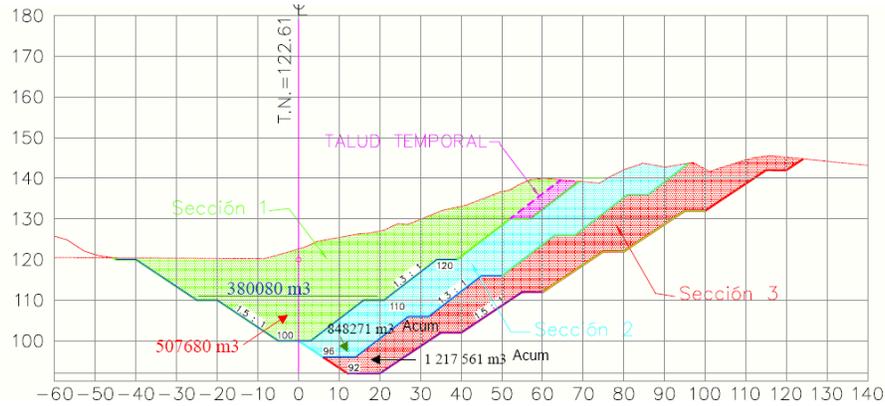


Fig. 11. Sección esquemática del canal que muestra los volúmenes a excavar en cada etapa.

3.4 Excavación del canal

La excavación del canal se dividió en tres frentes de trabajo, desde los cuales se efectuaron caminos auxiliares para conducir la rezaga hacia los bancos de desperdicio, tanto para la zona de aguas arriba como la de aguas abajo.

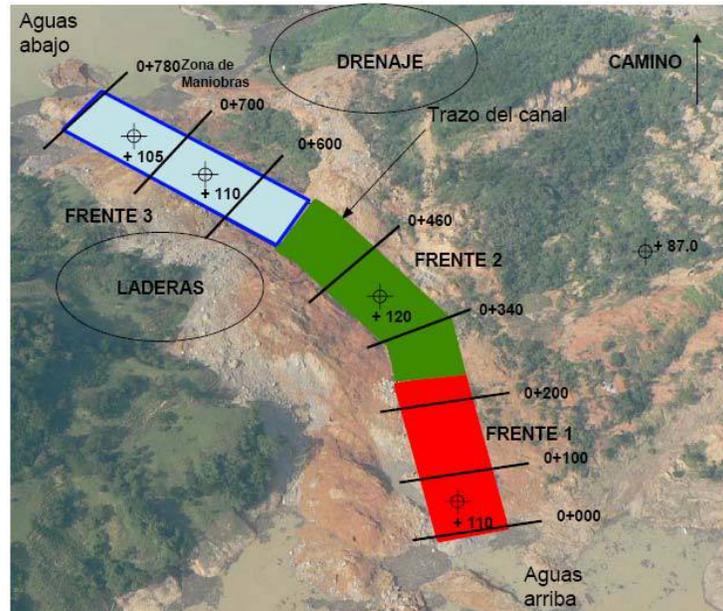


Fig. 12. Trazo de la excavación del canal.

Los mayores volúmenes de excavación se encontraron entre los cadenamientos 0+400 al 0+750 como se muestra en la figura.

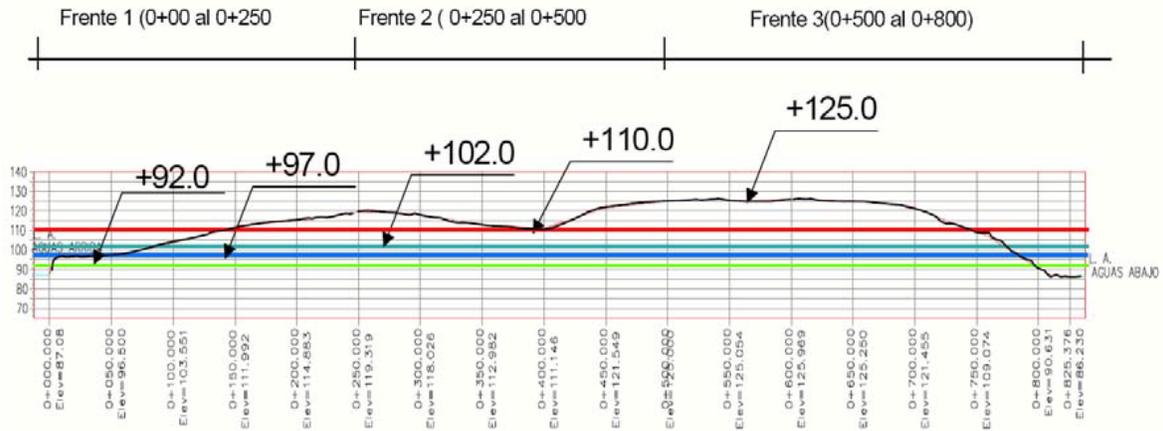


Fig. 13. Sección longitudinal del trazo del canal, volúmenes de excavación.

Con el apoyo de una máquina de perforación de aire (Hidrotrack- Ranger Mod. 500) se efectuaron sondeos de avance sobre el trazo del canal, con la finalidad de explorar las condiciones geológicas esperadas en las elevaciones 100, 95 y 92, que corresponden a los pisos de excavación de las etapas programadas. Con esta información, complementada con secciones geológicas superficiales, se generaron plantas geológicas horizontales en cada una de estas elevaciones, así como perfiles por el centro del canal, mostrando la distribución de materiales hacia el subsuelo, con los resultados obtenidos, aportaron una clara idea al constructor del tipo de materiales que habrían de encontrar en el proceso de excavación, así como los rendimientos del equipo y maquinaria.

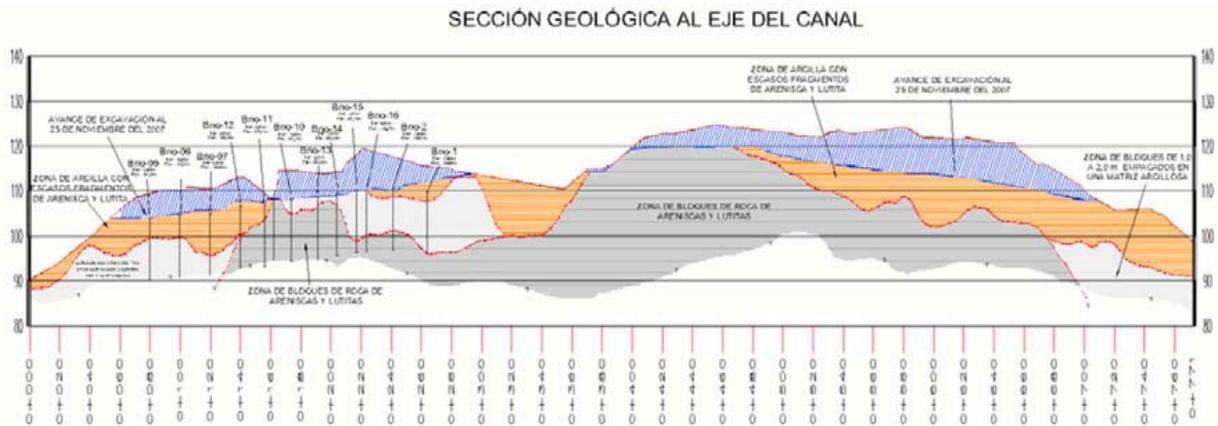


Fig. 14. Sección geológica al eje del canal.



3.5 Instrumentación

Para conocer la evolución y el comportamiento durante los trabajos de excavación, se instaló un sistema de instrumentación geotécnica en la primera etapa, que constaba de: referencias superficiales, sistema de estaciones remotas GPS, inclinómetros para desplazamiento horizontal y pozos de observación.

El objetivo principal del sistema fue determinar la magnitud, velocidad y dirección de los desplazamientos superficiales del terreno deslizado, tanto en superficie como a profundidad.

Para ello se establecieron tres métodos de medición redundantes:

- a. Mediante métodos topográficos, desde puntos fijos en la ladera izquierda, para la medición de todas las referencias superficiales, brocales bocas de los inclinómetros y bases de estaciones remotas GPS instalados en la zona de interés.
- b. Con tecnología de punta, estaciones remotas GPS-Tracker 3D las cuales mediante localización satelital permiten observar el movimiento en tiempo casi real.
- c. A profundidad con inclinómetros, tomando como punto fijo el fondo del barreno bajo el plano de falla.

La medición de los desplazamientos superficiales desde el 14 de noviembre de 2007 hasta finalizar la ampliación del canal se efectuaba diariamente, verificando la magnitud, la velocidad y la tendencia de los desplazamientos para una constante toma de decisiones cuyo objetivo principal era alertar sobre una posible reactivación del movimiento de la zona deslizada y bloques adyacentes.

Otro objetivo importante fue la determinación del nivel del agua en el subsuelo deslizado y en zonas fuera del deslizamiento, para conocer su variación estacional y evaluar el factor de la precipitación pluvial en el deslizamiento. Para lo anterior se instalaron pozos de observación y los ademes de inclinómetro fueron ranurados en su parte inferior para utilizarlos también como pozos de observación.

En la Tabla se indica el objetivo, la descripción básica, y la cantidad de instrumentos instalados en la zona de deslizamiento en su primera etapa: del 8 de noviembre de 2007 al 14 de enero de 2008.



Fig. 15. Instrumentación inicial instalada en el canal.

Sistema	Objetivo	Descripción	Cantidad instalada	Frecuencia de medición
Referencias superficiales	Conocer la magnitud, dirección y velocidad de los desplazamientos horizontales en la superficie del deslizamiento y en las zonas laterales a éste.	Los movimientos horizontales sobre la superficie del deslizamiento son determinados tomando como referencia dos bases de centraje forzoso en la ladera izquierda estables, utilizando un taquímetro electrónico para medir la distancia horizontal a cada referencia, calculando los desplazamientos mediante el método de trilateración	43	En la primera etapa medición topográfica diaria Con GPS-TRACKER 3D cada dos segundos,
Estaciones remotas GPS 3D	Determinar en tiempo casi real los desplazamientos de la superficie del terreno	Los desplazamientos de puntos cimentados en la superficie del deslizamiento, son determinados por la posición y el movimiento de la misma, tomando como referencia un mínimo de ocho satélites GPS, y determinando su desplazamiento diferencial respecto a una estación de referencia en la margen izquierda.	20	
Inclinómetros	Determinar la magnitud, velocidad y dirección de los desplazamientos horizontales en el subsuelo, dentro de los sub-bloques deslizados y debajo de la zona de falla	Los desplazamientos del subsuelo se determinan tomando como referencia el fondo del barreno, en la zona no alterada por el deslizamiento. Los desplazamientos se calculan comparando la geometría inicial de un ademe de inclinómetro instalado dentro del estrato deslizado y en la zona de roca bajo la falla	4	
Pozos de observación	Determinar la posición y variación del nivel del agua en el subsuelo	El nivel del agua se determina en el interior de un tubo ranurado, instalado dentro de un barreno vertical y cuyo espacio anular esta relleno con arena lavada	7	



Recopilación de Información

En apego a la normatividad en materia de levantamientos geodésicos y topográficos, señalada por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) se recopiló la información topográfica referente a la zona de estudios en cartas topográficas digitales, vértices topográficos y bancos de nivel. Esta información se utilizó como base para ubicar los levantamientos locales referidos al marco geográfico en modalidad de navegación.

Con el objeto de manejar la información topográfica relacionada a la zona del deslizamiento, se realizaron una serie de mediciones con equipos de posicionamiento satelital (Global Position System, GPS) asignando valores de navegación a un punto de control denominado "Base" en el sitio, desde donde se trasladan valores a toda la zona del deslave y embalse.

El posicionamiento se realizó con equipos receptores de señal por satélite GPS de primer orden, mediante la metodología diferencial en la modalidad de estático, manejando un tiempo de recepción con un lapso mínimo de 120 minutos, captando no menos de 4 satélites; debido a la premura por el manejo de la información y la carencia de vértices del INEGI, cercanos a la zona los valores obtenidos fueron coordenadas geodésicas de navegación y UTM usadas localmente en forma ortogonal.

A partir de los vértices GPS del control, se desarrollaron poligonales con estación total y posicionamientos independientes con GPS, con el objeto de densificar los valores, distribuidos de acuerdo a la ubicación de los trabajos de otras disciplinas.

3.6 Configuración Topográfica zona del canal

Inicialmente se calculó el volumen a remover y se configuró el terreno mediante secciones transversales al eje del canal, mismas que quedaron como base para el cálculo diario de corte de terreno. Esta configuración se complementó con radiaciones para obtener un plano antes del inicio de la remoción de terreno sobre la traza del canal. Se realizó ante la necesidad de evaluar el volumen total desplazado y contar con una base topográfica de la superficie después del derrumbe, se realizó en muy corto tiempo mediante el uso de tecnología GPS en tiempo real, dado la premura en el manejo de la información, aplicando la metodología de radiaciones basados en una estación de referencia (Base) y otros móviles, que se colocan en cada punto donde se requieren conocer sus coordenadas y por medio de un radio módem aplican la corrección inmediata a los vectores de posición, obteniendo así los valores coordenados de cada punto in situ.

Adicionalmente se representó en un perfil longitudinal que ilustra con claridad el avance diario y apoyados en la sección tipo que se consideró para efecto construcción del canal, acumulando un volumen final de 1 080 568 m³.

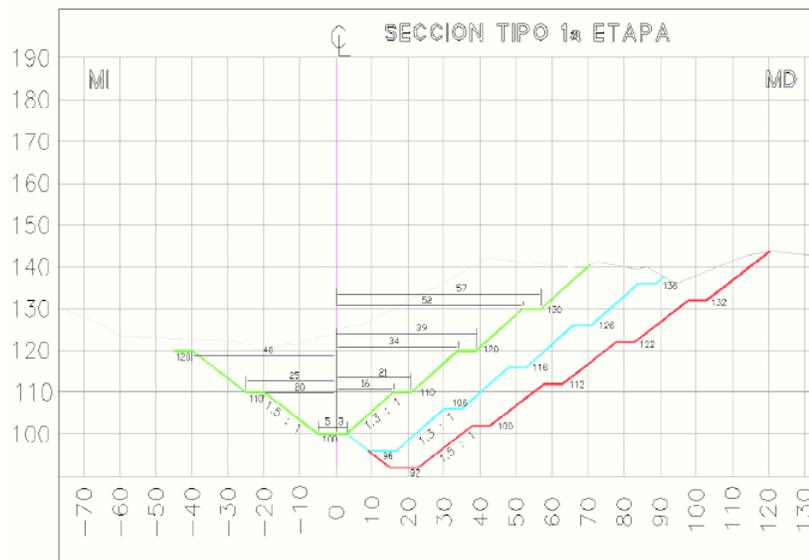


Fig. 16. Sección transversal del trazo del canal.

Batimetría en embalse de la C. H. Peñitas

Se llevó a cabo un levantamiento batimétrico en el embalse, en el tramo comprendido entre la cortina de la C.H. Peñitas y el “tapón” y otro hacia aguas arriba de éste cubriendo una longitud sobre el cauce de 13,5 Km. El objetivo de este levantamiento fue la configuración de las curvas de nivel dentro del embalse y con ello estar en posibilidad de evaluar el azolve acumulado en el vaso desde 1996, fecha del último evento, además de poder valorar lo aportado por el derrumbe, dado que el levantamiento se realizó antes de la apertura del canal.

Este levantamiento consistió en líneas paralelas con 50 m y 100 m de separación en promedio; en la obra de toma, vertedores y cortina, en tanto que en el resto del vaso (ramificaciones), la navegación varió entre 100 m y 150 m de separación dependiendo de la dificultad para navegar. Para obtener las profundidades existentes en el lecho del embalse, se realizó la interacción de dos equipos de medición, una ecosonda digital marca: ELAC y un par de equipos GPS con corrección de posición en tiempo casi real, la ecosonda proporciona la profundidad del sondeo y con los GPS la posición del mismo. Ambos aparatos son configurados para que envíen a través de los puertos seriales la información a una computadora portátil, de manera simultánea cada segundo, siendo estos almacenados automáticamente por el equipo.

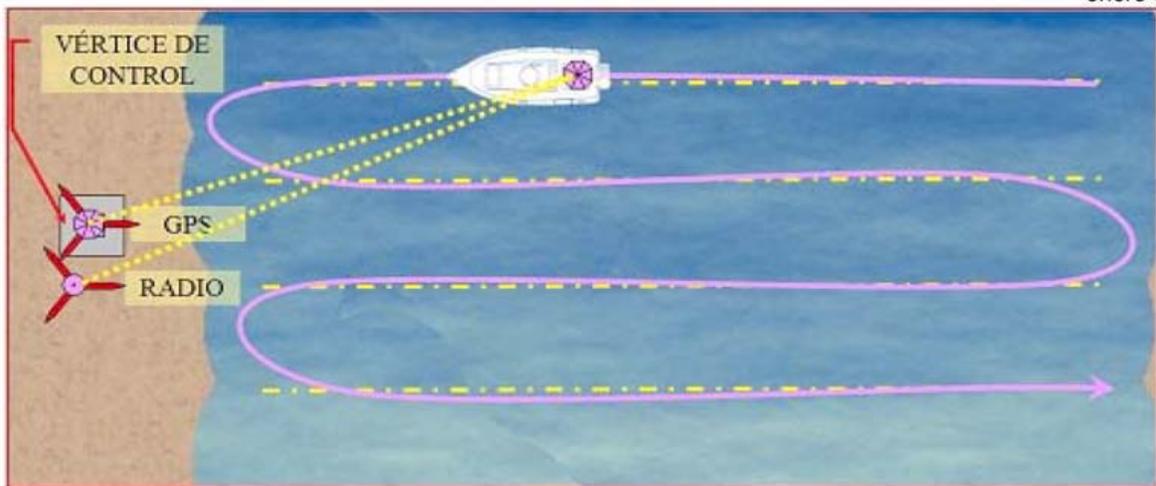


Fig. 17. Batimetría en el embalse de la C.H. Peñitas.

3.7 Conclusión capitular

Después de analizar la problemática del río obstruido y las implicaciones de lluvias inminentes en los meses de noviembre y diciembre se optó por construir, en una primera etapa, un canal de 800 m de longitud con una sección trapecial de 6 m en su base, 80 m en promedio en su parte superior y una profundidad aproximada de 28 m.

Posteriormente se amplió en una segunda etapa aumentando el ancho de plantilla de 6 a 70 m, incrementando la capacidad de conducción de 500 a 4000 m³/seg y tendiendo sus taludes a valores de 1:1 (H: V). Permitiendo reducir de forma controlada los niveles de los embalses ubicados aguas arriba del deslizamiento y estar en condiciones óptimas para recibir la siguiente época de lluvias.

CAPÍTULO 4 SOLUCIÓN A MEDIANO PLAZO

(Galería de drenaje y zanja dren)

4.1 Introducción capitular

Uno de los factores que provocaron el deslizamiento fueron los elevados niveles freáticos que prevalecían en la zona como consecuencia de las intensas lluvias que se presentaron en la temporada del 2007. Por lo tanto el reto no terminó con la excavación y ampliación del canal sino que fue necesario realizar un estudio hidrológico y trabajos para la estabilización de los taludes del canal mediante el drenado del agua subterránea y canalización del escurrimiento superficial por lo cual se construyó una zanja-dren y una galería de drenaje.

4.2 Hidrología superficial

La hidrografía regional muestra dos tipos de drenaje; el dendrítico asociado a la baja permeabilidad de la roca y su baja dureza; y paralelo el cual está gobernado por las estructuras geológico-estructurales existentes en la región. De esta manera se definen cuatro cuencas hidrológicas: La cuenca del Río Sayula, La cuenca del Arroyo La Laja y la cuenca del área de “El tapón” (zona de estudio). Los escurrimientos de mayor importancia son, el Río Grijalva, el arroyo La Laja y el Río Sayula.



Fig. 18. Cuencas hidrológicas en la región.

La cuenca hidrológica “El Tapón” es una cuenca pequeña con una superficie aproximada de 1,400,000 m² y salida exclusiva hacia el Río Grijalva. Se observa que esta cuenca está fuertemente seccionada por un fracturamiento paralelo, lo cual ha labrado seis cauces locales e importantes que conservan un rumbo NE 60° SW , siendo en si mismos el

drenaje principal de sus respectivas micro cuencas. Un acercamiento a las condiciones originales de la subcuenca “El Tapón”, permitió observar la existencia de 6 microcuencas todas paralelas entre si. Las condiciones de tamaño y numero de microcuencas preexistentes, todas gobernadas por patrones estructurales como fallas y/o fracturas, sugieren desde un principio, una zona inestable. Este aspecto fue uno de los de mayor importancia en el suceso

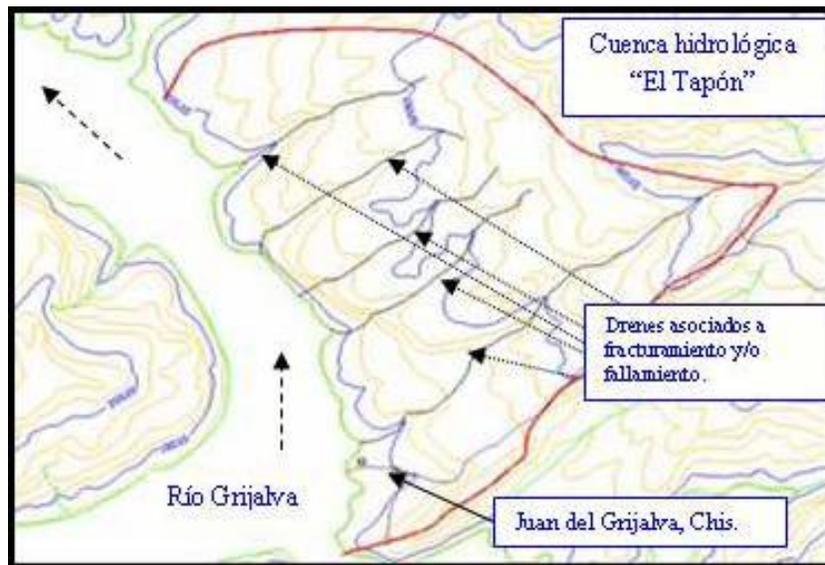


Fig. 19. Cuenca hidrológica “El Tapón”.

Las conclusiones más importantes emanadas de estos resultados son:

- Para las condiciones de elevación del fondo del canal y posición del nivel freático, los factores de seguridad de los tres bloques de la margen derecha se encuentran entre 1,3 y 1,7.
- Para las condiciones del fondo del canal, los niveles freáticos en la margen derecha tendrían que sobreelevarse del orden de 20 a 30 m de manera generalizada para que los factores de seguridad se acercaran a valores de 1.1.
- Si el fondo del canal sufriera socavación hasta la elev. +75.0 los niveles freáticos sólo tendrían que sobreelevarse del orden de 15 a 20 m para llegar a factores de seguridad de 1.1.
- La estabilidad de los bloques de la margen derecha dependía en gran medida de la roca fragmentada que se encontraba sobre el cauce, que actuaba como una “cuña” de apoyo. Si este material es removido por efectos de la socavación o de la erosión lateral de las márgenes del canal, el deslizamiento podía reactivarse y obstruir nuevamente el cauce del río.

Por lo anterior, la zanja-dren y la galería de drenaje fueron fundamentales para garantizar la estabilidad de los bloques de la margen derecha. A estas obras habrá que sumar otras



destinadas a proteger las márgenes del canal contra la socavación lateral y contra la socavación excesiva.

4.3 Estudio hidrológico

Además de la reapertura del tapón, es necesario mantener la estabilidad de los taludes mediante el drenado del agua subterránea y canalización del escurrimiento superficial, en las futuras precipitaciones en el sitio. Se considera que la galería y la zanja-dren son los mecanismos principales para lograr el alivio del exceso de agua subterránea y escurrimiento superficial; aunque también se consideran baterías de pozos como sistemas de alivio.

Fue necesario el análisis previo del comportamiento hidrogeológico de dichos sistemas de alivio, mediante un modelo matemático de flujo del agua subterránea, simulando el funcionamiento de la galería y la zanja-dren ante diferentes situaciones hidrogeológicas; así como también, para dimensionar los barrenos y espaciamientos necesarios sobre el trazo de la galería para el drenado óptimo.

Para obtener una respuesta respecto al problema anterior, fue necesario primeramente efectuar el balance hidrológico de la zona de deslizamiento: Para determinar el balance se cuantifican los términos de infiltración y escurrimiento superficial, así como los términos de precipitación y evapotranspiración en el sitio. El balance permite estimar los volúmenes infiltrados en el área del estudio, por concepto de precipitación, así como los desalojados por concepto de flujo superficial. Los volúmenes infiltrados son lo que potencialmente deben ser captados, conducidos y drenados por la galería y el dren. El análisis del funcionamiento hidrológico de la galería y la zanja-dren, así como la determinación el número de pozos y espaciamientos óptimos sobre la galería para drenar el mayor porcentaje del caudal subterráneo existente, se logra con el modelo numérico de flujo subterráneo.

Balance hidrológico

El balance hidrológico de subcuenca, tiene los siguientes objetivos:

- Determinar el modelo lluvia, infiltración y escurrimiento.
- Construir el modelo de flujo subterráneo del sitio.

Con el primer objetivo se determina el volumen de agua de infiltración y escurrimiento, dado un evento de precipitación. Dicho volumen de infiltración habrá de ser potencialmente captado por la galería, zanja-dren o sistemas de pozos. Con el modelo de flujo se analizó el comportamiento hidrológico de la galería y el dren. Así como también se determinó el número de pozos y espaciamientos óptimos sobre la galería para drenar el mayor porcentaje del caudal subterráneo existente.

Para llegar a los objetivos se realizaron pruebas de campo para determinar:



1. Coeficientes de infiltración vertical; la actividad se realiza mediante pruebas de infiltración tipo Porchet de carga variable y de carga constante.
2. Términos de drenaje superficial y escurrimiento; la actividad se realiza mediante aforos de microcauces naturales de ladera.
3. Términos de recarga lateral de cotas topográficas elevadas y laterales de la superficie de deslizamiento; mediante dictamen geohidrológico.
4. El modelo conceptual geohidrológico.
5. Los términos de precipitación y evaporación; mediante la recopilación y análisis de la información hidrometeorológica de estaciones más cercanas.
6. Términos de evapotranspiración de la zona con vegetación.
7. Determinar los parámetros hidrogeológicos de conductividad hidráulica, mediante la recopilación y análisis de pruebas de campo Lefranc y de bombeo efectuadas en el sitio

Con base en las actividades anteriores:

8. Determinar el modelo lluvia, infiltración y escurrimiento del sitio.
9. Construcción del modelo de flujo subterráneo para analizar el funcionamiento de la zanja-dren, galería y barrenos en el Cuerpo Principal y Zona de Relictos de la margen derecha del canal Juan de Grijalva, Chis.

Pruebas de infiltración Porchet

La actividad se desarrolla para determinar los coeficientes de infiltración vertical, mediante pruebas de infiltración tipo Porchet de carga variable y de carga constante. Se realizaron pruebas de infiltración somera en 48 sitios; 3 series de carga variable con duración de 30 minutos cada una; 3 series de carga variable hasta agotar la carga inicial de agua; 1 serie de carga constante, hasta que el volumen infiltrado fuera constante por unidad de tiempo.

Términos de drenaje superficial y escurrimiento

El estudio del escurrimiento superficial en la zona de falla cubrió dos objetivos:

- Verificar la suficiencia de la capacidad hidráulica de los drenes longitudinales propuestos en la parte inferior de la zona que sufrió el desplazamiento de tierra, denominada Zona del Relictos.
- Comparar la eficiencia de dos opciones de drenes adicionales al anterior, propuestos para disminuir el volumen de agua que se infiltra, y que podría ser captada parcialmente por la galería subterránea paralela a los drenes longitudinales.

Términos de recarga lateral

Se efectúa la evaluación geohidrológica de las laderas topográficamente más elevadas y laterales del material deslizado en una franja de aproximadamente 1,500 m. Por la Falla



Norte no había evidencias de escurrimientos superficiales ni subterráneos. En el extremo Este de la Falla Sur existían descargas y escurrimientos, superficiales y subterráneos hacia la Zona de Relictos y escurrimientos que afloraban entre los estratos; en la parte Oeste de la misma no había ningún escurrimiento. Se determinó que en conjunto las estructuras concentran agua de origen pluvial que se almacenaba en los depósitos de talud, suelo y arcillas. Se identificó a la Falla La Laja como el parteaguas topográfico, y no se existían en ella escurrimientos superficiales ni subsuperficiales.

Modelo conceptual geohidrológico

Se determinó que los límites Norte, Este y Oeste del límite Sur son impermeables; mientras que la porción Este del límite Sur presentó evidencias de aporte lateral, dándole un carácter del límite semipermeable. Se indicaba que la recarga del sistema proviene de la infiltración de la lluvia y en menor escala provienía de aportaciones laterales superficiales y subterráneas de la parte Oriental de la Falla Sur.

Términos de evapotranspiración

La determinación de la evapotranspiración se realizó en dos partes: la primera consiste en la identificación de las comunidades vegetales y el cálculo de la superficie ocupada, y en segundo lugar está el cálculo del valor de la evapotranspiración por tipo de vegetación. Se identifican dos tipos de comunidad vegetal: Vegetación Secundaria de Selva Alta y Mediana Perennifolia y Pastizal Inducido.

Parámetros hidrogeológicos de conductividad hidráulica

Determinar los parámetros hidrogeológicos de conductividad hidráulica, mediante la recopilación y análisis de pruebas de campo Lefranc y de bombeo efectuadas en el sitio. La conductividad hidráulica es una característica del subsuelo asociada con su facilidad para permitir el flujo del agua subterránea. Se determinó que en la Zona de Relictos la conductividad hidráulica es mayor que en los bloques. Lo anterior está en concordancia con la situación de que la Zona de Relictos presenta mayor permeabilidad y fracturamiento, que la zona entre la Galería y el Dren, debido a que el Cuerpo Principal solo sufrió desplazamiento durante el desgajamiento del cerro; mientras que la Zona de Relictos sufrió desplazamiento y molienda. Las pruebas Lefranc y de bombeo realizadas sostienen este argumento; y de una forma directa concuerda con los resultados de las pruebas someras de Porchet.

Modelo lluvia, infiltración y escurrimiento

El modelo de lluvia, infiltración y escurrimiento se obtiene a partir de las pruebas de Porchet, aforos para determinar el escurrimiento, estimaciones de evapotranspiración y análisis hidrometeorológico; al cual, se le aplica un factor de corrección del orden de 0,31% para la zona del Cuerpo Principal entre la galería y la zanja-dren por concepto de evapotranspiración. Con base en los resultados de campo con el método de Porchet, se deduce que el tiempo de saturación del medio es del orden de 60 min. La condición para alcanzar la saturación de suelo se tiene con una lluvia antecedente de al menos 78 mm/h, con una duración de una hora.

En la Tabla se muestra el balance para una lluvia antecedente de al menos 100 mm/h, con una duración de una hora; se considera que el caudal de recepción, en las áreas indicadas, se mantiene de una a dos veces la duración del evento de precipitación. Se determinó que la zona entre la zanja-dren y la corona (área amarilla) recibe un volumen de 16,688 m³, mientras que la zona entre la galería y la zanja-dren (área azul) uno de 5,457 m³; las regiones amarilla y azul tienen áreas de captación de 313 008,39 m² y 157 532,13 m², respectivamente.

	Tasa captada (m ³ /h)	
	Zona Galería-Dren	Zona Dren-Corona
CONDICIÓN EXTREMA Máximo de Infiltración 100 mm/h x 1 h	15 753	31 300
INFILTRACIÓN (PORCHET)	5 457	16 688
ESCORRENTÍA	10 296	14 612

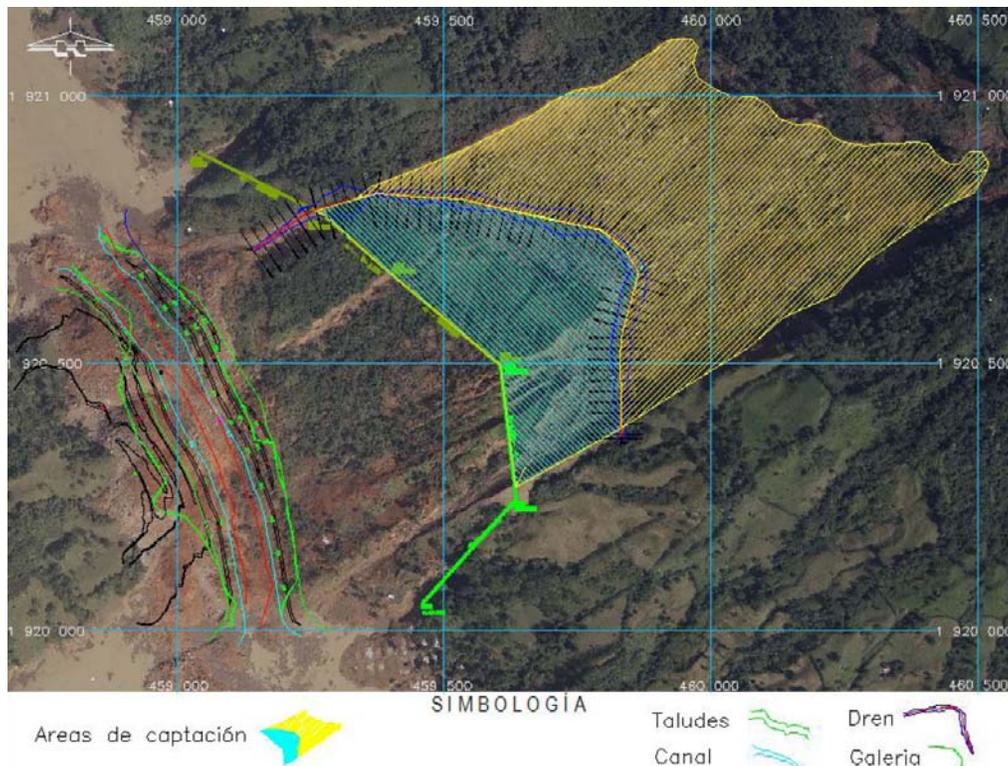


Fig. 20. Áreas de captación, galería-dren y dren-corona.

4.4 Obras de drenaje

Uno de los factores que provocaron el deslizamiento fueron los elevados niveles freáticos que prevalecían en la zona como consecuencia de las intensas lluvias que se presentaron en la temporada del 2007. Este hecho se comprobó con los resultados de los estudios previos que se desarrollaron en el subsuelo y mediciones piezométricas, los cuales fueron concluyentes.

Con el fin de evitar que esas condiciones se presentaran nuevamente en la zona deslizada, se estudiaron diversas obras para contribuir a generar un drenaje eficiente que permitiera el desalojo de la mayor cantidad de agua en el menor tiempo posible. Evitando así la saturación y el subsiguiente incremento de niveles del agua subterránea. Se estudió dos tipos de drenaje uno superficial para captar los escurrimientos y un drenaje subterráneo para conducir el agua infiltrada en el subsuelo. Para definir las características y calcular las dimensiones de estas obras se desarrolló un estudio hidrológico local.

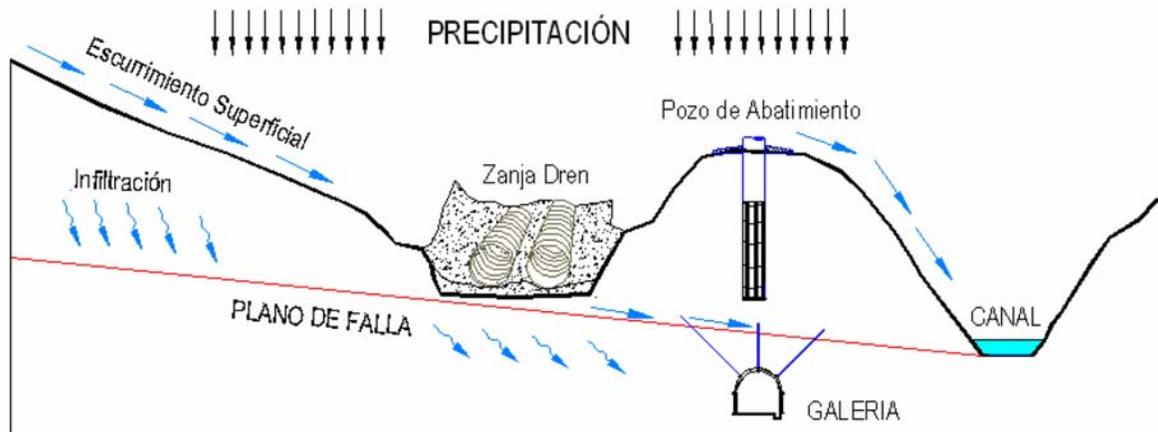


Fig. 21. Esquema de drenaje de la zona deslizada.

4.4.1 Drenaje superficial

El drenaje superficial se compone de dos obras principales una zanja–dren de 1,054 m de longitud y la conformación de escurrideros en la zona de Relictos y el cuerpo principal deslizado.

Zanja-Dren

El objetivo principal de la zanja-dren es captar y desalojar los escurrimientos superficiales producto de la precipitación en la zona de Relictos y las aportaciones que se presentan por escurrimientos de subcuencas aledañas.

Consiste en una zanja con sección trapecial de 6 m de base y altura variable que aloja 2 tubos de acero de 1 m de diámetro con ranuras de 3/8" de abertura en la parte superior. La tubería quedó recubierta con un filtro de materiales graduados en varias capas y finalmente un relleno de protección con material producto de excavación. El tramo comprendido entre el cadenamamiento 0+000 al 0+330 se diseñó únicamente como línea de conducción, por lo tanto no fue necesario colocar el filtro de materiales graduados ni tubería ranurada. Se instaló tubería lisa y se relleno con material producto de excavación.

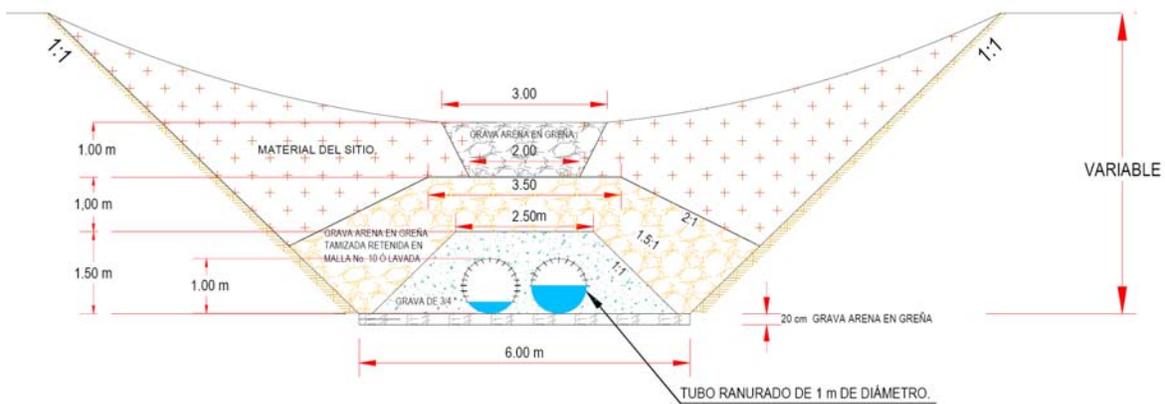


Fig. 22. Esquema de la zanja-dren.

La zanja – dren se ubicó en la parte superior de la zona deslizada, funcionando como una cuneta interceptando los escurrimientos superficiales de un área de 313,000 m².



Fig. 23. Esquema de la captación de escurrimientos de la zanja-dren.

El objetivo de hacer una zanja-dren atrás del cuerpo principal del movimiento, es decir, atrás de la zona de bloques deslizados: es el de retirar la mayor cantidad de agua que baja de la zona de Relictos en temporada de lluvia principalmente. Para tal efecto, se realizaron 7 barrenos ubicados a lo largo de la zanja-dren con el objeto de cortar la traza de la falla Juan del Grijalva. Una vez hecho lo anterior se excavaría hasta dicha falla. Lo anterior no fue posible ya que la falla se localizó a más de 10 metros de profundidad por lo que el material excavado sería demasiado. Se optó por hacerla por encima de dicha falla.

Al fondo de la zanja-dren se colocaron 2 tubos ranurados con el objeto de captar la mayor cantidad de agua que baja de la zona de Relictos. Acto seguido se colocaron filtros invertidos para evitar el abundamiento formado por el flujo de agua hacia la zanja-dren excavada. Al ser un material totalmente suelto considerado como flujo de escombros, a

excavar para hacer la zanja se originó una sub presión en el terreno proveniente del costado elevado (al Este de la zanja) que invadió la zanja y la rellenó.

Escurrideros

Su objetivo principal es impedir la infiltración del agua de lluvia, captar y desalojar los escurrimientos superficiales tanto en la zona de Relictos como en el cuerpo principal deslizado.

El funcionamiento de los escurrideros se ideó mediante la construcción de una capa impermeable en toda la superficie expuesta a la precipitación pluvial. Aprovechando que la lutita imtemperezada se comporta como una arcilla plástica con características impermeables, se uso ese mismo material de la zona para conformar un terraplén compactado en toda el área.

Finalmente, se crearon unas canaletas que coincidieron con los escurrimientos naturales que se originaron con la conformación topográfica prevaleciente después del deslizamiento.

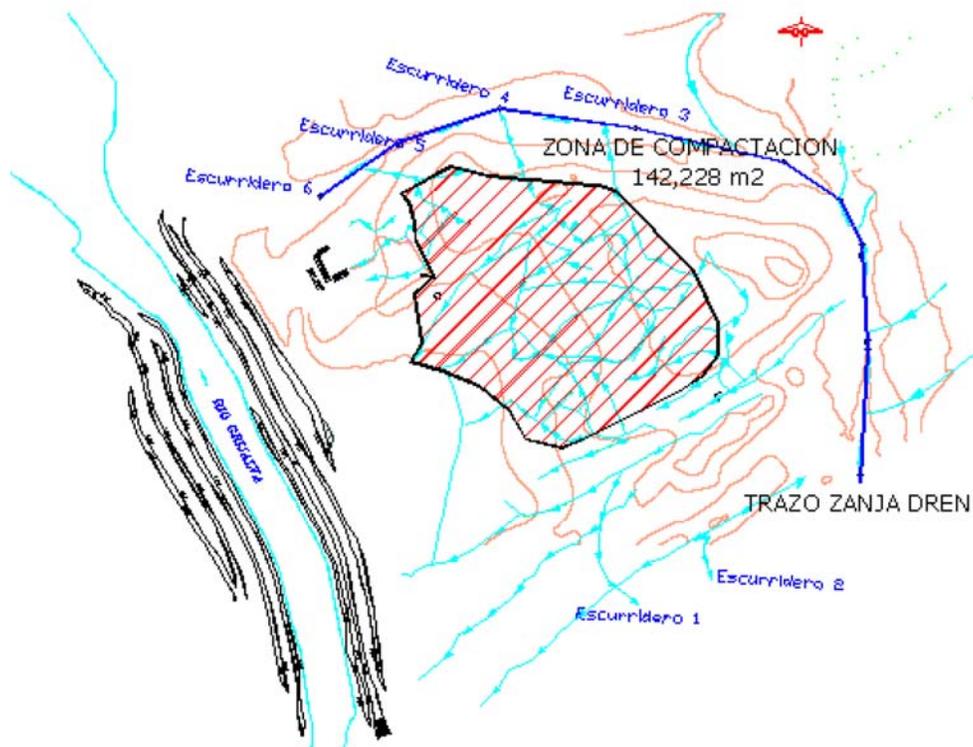


Fig. 24. Esquema de la captación de escurrimientos.

4.4.2 Drenaje subterráneo

El drenaje subterráneo se compone de dos obras principales una galería de drenaje de 1,106 m de longitud y una batería de 4 pozos de 80 m de profundidad en promedio.

Galería de drenaje

Como su nombre lo indica, el objetivo de esta galería es drenar el agua que se acumule en la zona deslizada, es decir sobre el cuerpo principal. Para tal efecto, fue necesario hacer una galería por debajo de la traza de la falla Juan del Grijalva, en roca sana para después hacer unos barrenos hacia arriba en forma radial hasta llegar y pasar dicha falla.

Con este sistema se considera que el cuerpo principal que es donde se ubican las unidades 1, 2 y 3 no se saturará de agua, evitando que dicho cuerpo se deslice hacia el río obstruyendo el canal o parte de él.



Fig. 25. Sección longitudinal de la Galería.

De acuerdo con el estudio hidrológico un 47% de la precipitación pluvial logrará infiltrarse al subsuelo, para captar y desalojar se diseñó la galería de drenaje, que consistió en un túnel de secciones portal y cuadrada con una longitud total de 1,106 m. La galería se ubica en la margen derecha del canal y se dividió, para efectos constructivos, en dos frentes denominados Galería 1 y 2.

Galería 1.

Inicia el 25 de marzo de 2008 y tiene su portal de salida aguas abajo del canal en la cota 88 msnm y una longitud de 672 m con una pendiente de 0.05%, es de sección cuadrada debido al equipo utilizado. Desde el portal hasta la falla Norte se cortaron rocas de buena calidad constituidas por areniscas y conglomerados polimicticos. A partir de ahí se cortaron lutitas, limolitas y areniscas de grano fino hasta juntarse con la galería 2.

La presencia de agua durante la excavación es a través de las fallas y fracturas existentes en la zona. La roca se presentó estable, los estratos son subhorizontales con una dirección N 8° E /2°NW, como estructuras primarias se tiene a la estratificación cruzada y gradada, así mismo los clastos del conglomerado son de granitos, andesitas, granodioritas, calizas, areniscas y gneises, con matriz arcillosa.



Fig. 26. Esquema y vista de la galería de drenaje aguas abajo.

Galería 2.

Se localiza agua arriba de la zona del canal en la elevación 90.49 msnm, en un cantil vertical donde termina un arroyo, con una longitud de 434 m y una pendiente promedio de 0.4%, en sección portal de 4.3 m X 3.6 m. Desde su inicio se encontró rocas sedimentarias constituidas por lutitas, limolitas de color gris oscuro y areniscas de grano fino a medio de color gris claro las que se muestran en forma de alternancia, los estratos tienen un rumbo N 1°E / 6° NW.



Fig. 27. Esquema y vista de la galería de drenaje ubicada aguas arriba.

Los criterios que se consideraron para la ubicación definitiva de la galería fueron que la cota de los portales se localiza arriba del nivel de aguas máximas ordinarias de la presa Peñitas, y al mismo tiempo que el túnel se localizara cuando menos 10 m abajo del plano de falla del bloque deslizado. Finalmente se pretendía que estuviera lo más cerca posible del canal.

Una vez excavada la galería el drenaje se complementó con una red de barrenos perforados en la parte superior de la galería adentrándose en el macizo rocoso y cruzando el plano de falla del bloque deslizado. Este sistema de barrenos se realizó en tres etapas subsecuentes.

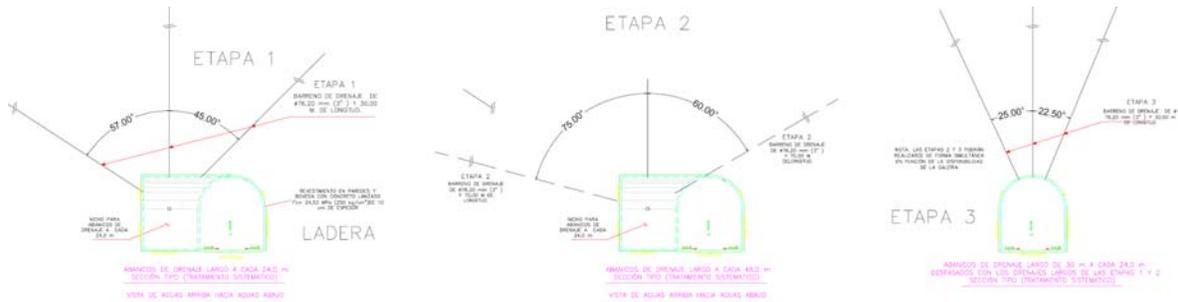


Fig. 28. Etapas de sistema de barrenos de drenaje.

Se inició perforando la primera etapa en forma sistemática y se realizó el aforo del gasto que aportaba cada barreno, la decisión de llevar a cabo las etapas subsecuentes dependió del gasto drenado por los barrenos. Como resultado del diseño geotécnico de las galerías se definieron una serie de tratamientos de roca sistemáticos que se requirió aplicar durante el proceso constructivo de las galerías para asegurar su estabilidad, los cuales consisten principalmente en marcos metálicos de soporte, anclaje de fricción y concreto lanzado.

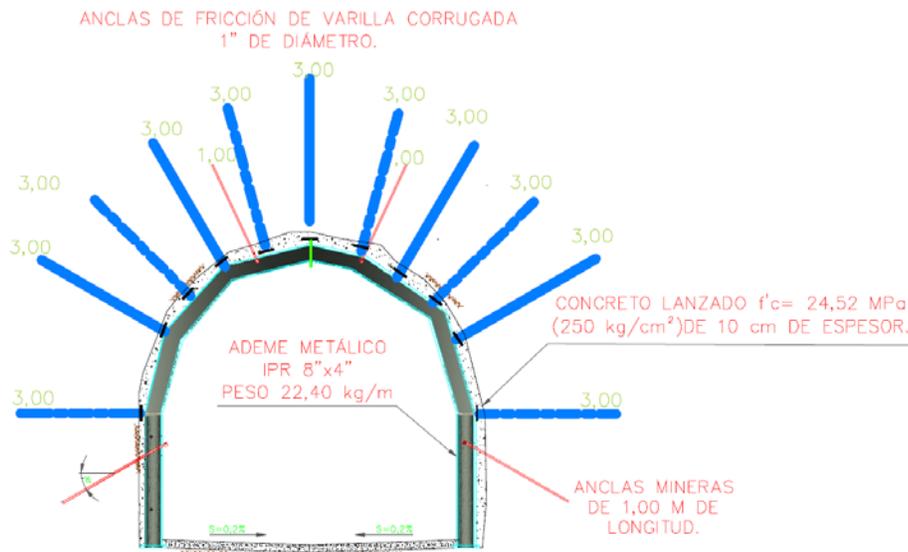


Fig. 29. Esquema de los tratamientos de refuerzo en las galerías.

Los marcos metálicos tienen la función de soportar los esfuerzos del terreno asociados a las características geológicas del mismo y provocados por el retiro del material excavado. El anclaje de fricción está orientado a sostener bloques de roca que pudieran formar cuñas potenciales y evitar su desprendimiento. Finalmente, el concreto lanzado además de la función de soporte tiene el objetivo de proteger la roca del intemperismo y evitar su degradación.

Pozos de abatimiento

Dada la proximidad de la temporada de lluvias del 2008 y que las galerías de drenaje aún estaban en proceso de construcción, se requirió diseñar y construir una batería de pozos de abatimiento que tenían la finalidad de extraer agua del subsuelo en la zona del cuerpo principal deslizado para abatir los niveles freáticos.

En una primera instancia, estos pozos fueron la única fuente de abatimiento de niveles de agua infiltrada en la zona, pero una vez concluidas las galerías ambas obras son complementarias en este proceso de abatimiento. En la parte superior del cuerpo principal deslizado se ubicaban la zona con las lecturas piezométricas mayores, por lo tanto, se realizaron los análisis geohidrológicos correspondientes considerando la permeabilidad, el grado de fracturamiento y la profundidad del plano de falla del deslizamiento. Con estos parámetros se determinó que se requerían 4 pozos de 75, 70, 85 y 75 m de profundidad para cumplir con el objetivo determinado.

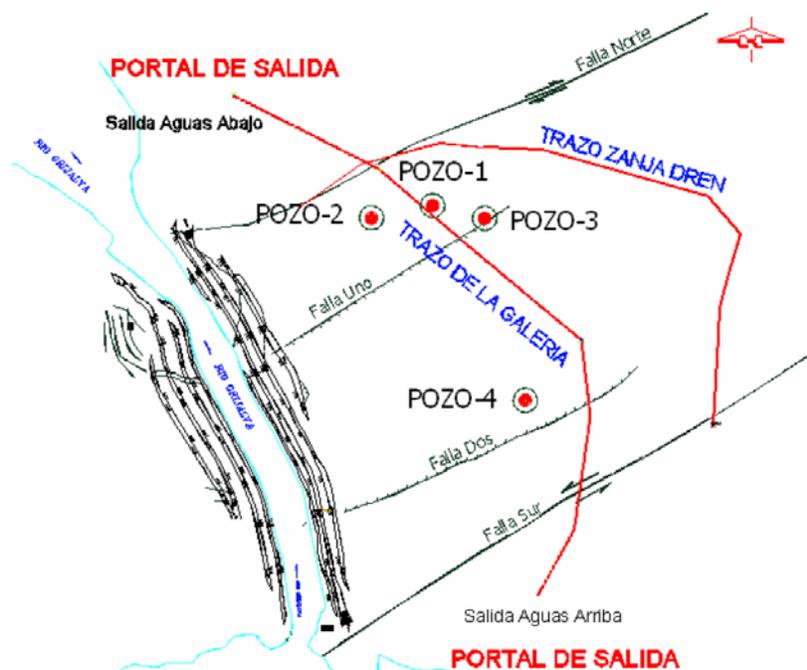


Fig. 30. Localización de los pozos de abatimiento.

4.5 Conclusión capitular

La zanja-dren y la galería de drenaje son fundamentales para evitar la saturación y el subsiguiente incremento de niveles del agua subterránea y mantener la estabilidad de los bloques de la margen derecha mediante el drenado del agua subterránea y la canalización de los escurrimientos superficiales asociados a las precipitaciones.

CAPÍTULO 5 SOLUCIÓN A LARGO PLAZO

(Excavación de dos túneles de desvío)

5.1 Introducción capitular

Con el objeto de asegurar el flujo del río y evitar futuras inundaciones en el tramo aguas arriba de la comunidad Juan del Grijalva, Chis. (deslizamiento) y hasta la presa Malpaso, a 2,4 km aguas arriba del tapón, se construyen dos túneles de conducción en la margen izquierda por donde pueda pasar el agua de este embalse desde aguas arriba a aguas abajo.

5.2 Localización

La zona de los túneles de conducción se localiza en la margen izquierda del Río Grijalva, 12 km al sureste y sobre el embalse de la presa Peñitas, 3 km al Oeste del poblado Juan del Grijalva, en el Municipio de Ostuacán, Chis. Este sitio se ubica en la región Norte del estado de Chipas, 75 km al Noroeste de Tuxtla Gutiérrez y 95 km al Suroeste de Villahermosa, muy próximo al límite del estado de Tabasco.

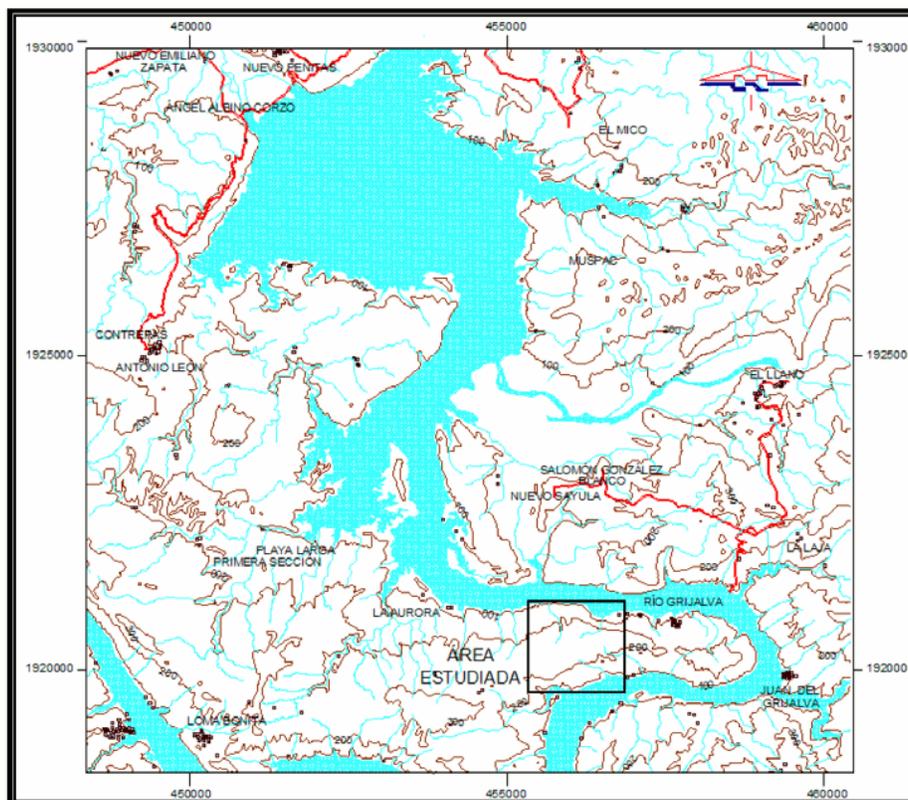


Fig. 31. Zona de estudio para los túneles de desvío.



Fig. 32. Vista de la zona de estudio para los túneles de desvío.

5.3 Estratigrafía

La estratigrafía en la zona de los túneles de conducción, y en general en la región de San Juan del Grijalva, Chis. (donde se produjo el deslizamiento), está representada por una secuencia rítmica de rocas sedimentarias terrígenas, que en orden de abundancia son areniscas, conglomerados, limolitas y escasos horizontes de areniscas conglomeráticas, las cuales se encuentran cubiertas parcialmente por materiales sin consolidar (depósitos de talud y suelos residuales) que son producto de la erosión y alteración de las rocas mencionadas. El carácter rítmico de la secuencia local está determinado por la repetición de paquetes sedimentarios. Cada paquete está constituido por un conglomerado basal masivo, en partes con intercalaciones de areniscas de grano grueso y areniscas conglomeráticas.

Conforme se asciende, la columna litológica (y estratigráfica) va gradando a una granulometría menor, así como su estratificación se hace cada vez más delgada, de tal forma que los conglomerados cambian gradualmente a areniscas conglomeráticas y areniscas de grano grueso, con estratificación media, hasta llegar a areniscas de grano medio a fino, limolitas y escasas lutitas en la cima de los paquetes, dispuestas estas últimas, en estratos delgados y laminares.

5.4 Condiciones geológicas

En la zona de los túneles de conducción el macizo rocoso es afectado por varios tipos de discontinuidades, entre las principales se mencionan la estratificación, el fallamiento y el



fracturamiento. Cabe mencionar que varias de las fallas observadas o inferidas, son de talud, debido a que se comportan como deslizamientos en masa y afectan inclusive a los materiales recientes y sin consolidar. Con el análisis estadístico de los datos estructurales tomados en campo se determinó la orientación preferencial de estas discontinuidades.

Las superficies que delimitan estas discontinuidades también dependen de la granulometría de la roca, para las finas son planas lisas, para las de grano grueso son planas rugosas y pueden ser además de planas, onduladas.

Otra de las condiciones que afectan el macizo rocoso en la zona son las fallas existentes que son de longitud considerable. Estas estructuras son producto de la relajación de esfuerzos compresivos y transpresivos que han actuado en ésta región. También existen fallas de talud o deslizamiento en los depósitos recientes por procesos de remoción en masa o gravitacionales. Las fracturas afectan en menor grado al macizo rocoso.

5.5 Descripción de los túneles

Los túneles de conducción del río Grijalva están ubicados en la margen izquierda y consisten en dos excavaciones de sección portal de 14 x 14 m con una longitud total de 1,200 y 1,187 m y 45 m entre los ejes de los túneles.

Son de concreto hidráulico en la plantilla y concreto lanzado en la bóveda y paredes, tienen un canal de llamada y descarga común a cielo abierto, de 70 m de ancho. Están diseñados para un gasto de 2,604 m³/s, con un período de retorno de 10,000 años.

La perforación de la sección media superior inició por dos frentes, por el portal de entrada y por el portal de salida.

El inició de la perforación del Túnel 1 por el portal de entrada fue el 23 de octubre de 2009 y por el de salida el 7 de septiembre del mismo año. Los trabajos en el Túnel 2 iniciaron el 14 de octubre de 2009 a la entrada y el 26 de septiembre por el portal de salida

La excavación se efectúa en dos frentes con condiciones geológicas diferentes. La excavación se realiza en limolitas. Este tipo de roca arcillosa presenta desmoronamiento y disminución de su resistencia cuando queda expuesta a condiciones de humedad o en acción directa del agua, lo que produce zonas inestables y desprendimientos que pueden ser pequeños o de volúmenes importantes. La humedad, la temperatura y el aire dentro del Túnel provocan expansión y contracción en la roca, ocasionando agrietamientos internos, que generan bloques y vías potenciales de agua presentes desde la superficie. La presencia de agua que viene desde la superficie por las fallas verticales existentes acelera el proceso de deterioro de la matriz de la roca.

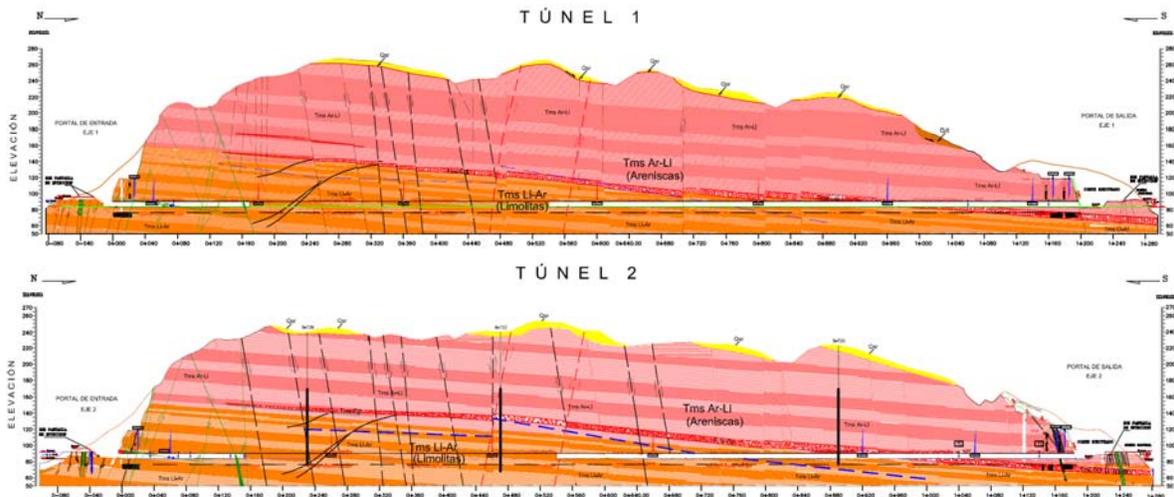


Fig. 33. Geología de los túneles de conducción, corte longitudinal por el eje de cada túnel.

Según el estudio geohidrológico para determinar el origen de las filtraciones y posición del nivel del agua subterránea en su primera etapa, concluye que en la superficie de la zona de los túneles existe roca fracturada con un espesor del orden de 11 m, por donde el agua de lluvia es captada y fluye aguas abajo de forma superficial, para después aflorar en manantiales en la parte media y baja de las laderas, este flujo también abastece de agua a fracturas y falla verticales que al ser interceptada por la excavación del Túnel da origen a las filtraciones.

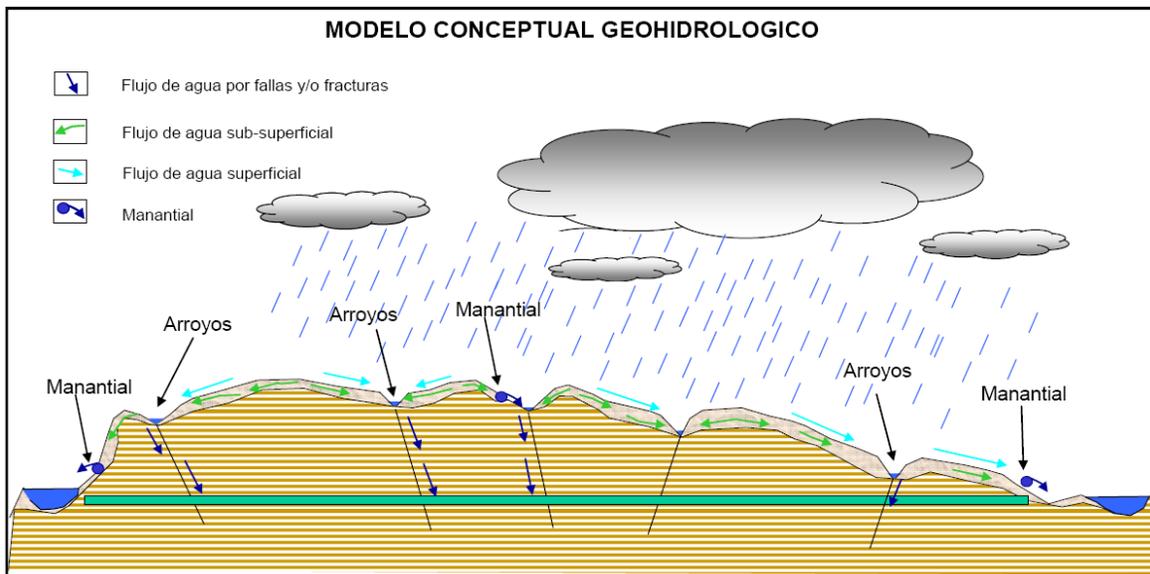


Fig. 34. Modelo conceptual geohidrológico.

A lo largo de la excavación de los túneles se han encontrado condiciones geológicas desfavorables, que han dado como resultado la intensificación de tratamientos mediante marcos de acero empacados en concreto hidráulico, anclaje y barrenos de drenaje.



Los mayores contratiempos se han originado del portal de entrada hacia el frente de la excavación, como resultado de la geología que impera; limolitas de fácil intemperización y con presencia de fallas verticales. Del portal de salida hacia el frente de la excavación los contratiempos fueron menores en el tramo donde se tiene arenisca. Estos contratiempos se han reflejado en la modificación de los tratamientos a los cortes, como la colocación de cuatro capas de concreto lanzado con fibras metálicas de 7 cm de espesor y malla entre la tercera y cuarta capa, en lugar de las tres capas de concreto lanzado con malla entre la segunda y tercera etapa inicialmente contemplada.

5.6 Conclusión capitular

Considerando el riesgo de reactivación del bloque deslizado y la limitación en la vida útil del Canal debido a las condiciones de emergencia en que fue construido; se proyectaron y están en ejecución, dos túneles de conducción aguas arriba del Canal.



CONCLUSIONES

La invasión de masas de aire frío del norte y húmedos tropicales del Atlántico y el Pacífico provocan la mayoría de las precipitaciones anuales en la región. Lluve prácticamente todo el año, el 83% de los 365 días, pero especialmente las lluvias se concentran en verano, otoño e invierno; sólo la primavera es relativamente seca. En el verano las lluvias son muy intensas. Entre el otoño y el invierno asociado a los fenómenos meteorológicos se presentan lluvias prolongadas y torrenciales. Los ríos y lagunas alcanzan sus máximos niveles entre septiembre y noviembre, lo que vuelve a la planicie un espejo de agua.

El control de los ríos para regular avenidas y generar energía contempló la construcción de grandes presas en varios puntos de las cuencas altas. En una primera etapa, se propuso el control y la regulación del sistema del río Grijalva. Allí se construyeron cuatro grandes presas: La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas.

El domingo 4 de noviembre de 2007, aproximadamente a las 20:30 horas y después de tres días de intensas lluvias en el sureste mexicano, ocurrió un deslizamiento en la ladera derecha del Río Grijalva, Chiapas, en el poblado de Juan del Grijalva, entre las presas de Peñitas y Malpaso. Este fenómeno geológico ocasionó que se obstruyera el cauce del río y se formara una ola de unos 50 m de altura que arrasó con el poblado Juan del Grijalva municipio de Ostucán, Chis., que se localizaba inmediatamente aguas arriba del deslizamiento; por la magnitud del volumen de tierra es muy probable que sea el más importante ocurrido en México. La obstrucción del cauce formó un tapón de aproximadamente 800 m de largo y 120 m de altura, en el embalse de la Presa Peñitas, impidiendo el flujo proveniente de aguas arriba de la Presa Malpaso del Complejo Hidroeléctrico Grijalva.

Como consecuencia del deslizamiento, la Comisión Federal de Electricidad detuvo la generación en las dos centrales aguas arriba del tapón, ya que el incremento del nivel de agua ponía en riesgo a las poblaciones asentadas aguas arriba del tapón y aguas abajo de la presa Malpaso.

Lo ocurrido en Juan del Grijalva es un fenómeno que sale de lo convencional principalmente por tres razones, primera el aspecto social, ya que al interrumpir el flujo del segundo río más caudalosos del país puso en riesgo los asentamientos humanos ubicados aguas arriba y aguas abajo del tapón debido a la posible ocurrencia de inundaciones; segunda el aspecto económico, ya que imposibilitó la operación normal de las centrales hidroeléctricas Netzhuacoyotl (presa Malpaso) y Ángel Albino Corzo (presa Peñitas) y finalmente, por la magnitud del deslizamiento que se calcula en más de 55 millones de m³.

El hecho que el deslizamiento se localizara en una parte del río entre dos presas, a 12 km de Peñitas y a 30 km de Malpaso, representó una circunstancia favorable para el manejo de la contingencia, ya que permitió controlar el flujo tanto aguas arriba, como aguas abajo del tapón y en la misma medida se redujo considerablemente el riesgo de un destaponamiento súbito o inundaciones masivas.



Dos tipos de fenómenos causaron el deslizamiento de Juan del Grijalva, uno de carácter geológico, que tiene que ver con aspectos litológicos y estructurales, y otro meteorológico, relacionado con una precipitación intensa que alcanzó los 1000 mm, entre los días 28 de octubre al 3 de noviembre de 2007, lo que provocó variaciones en el nivel freático de la masa rocosa y con ello un empuje de subpresión en la capa blanda de lutita, permitiendo que el bloque se deslizara.

La proyección del plano de falla o superficie de deslizamiento en el antiguo cauce del río es prácticamente en el lecho del río, por lo que al desplazarse el bloque, el movimiento continuó por la margen izquierda. De manera casi simultánea a que el bloque se moviera y separara, a través de las fallas de deslizamiento lateral que lo limitaban, el gran bloque se dividió en tres sub-bloques cuyos límites son también fallas pre-existentes. Estos bloques tuvieron dinámicas diferentes debido a la diferente resistencia encontrada.

Este mecanismo de falla, generó en el cauce del río, un tapón (de 15 millones de m³ en el cauce de un total de 55 millones de m³ desplazados) y el desplazamiento súbito de una gran masa de agua, que se manifestó como una ola gigante que arrasó con el poblado de Juan de Grijalva, Chiapas. La falla ocurrió sobre un estrato de lutita muy alterada con un echado del orden de 8 a 10° buzando hacia el río y ubicada a profundidades del orden de 60-80 m.

La premisa básica para definir la solución al destaponamiento era que en un plazo muy breve (45 días o menor) el río Grijalva debería estar nuevamente fluyendo con un gasto de 400 a 500 m³/s, por lo que se optó por la excavación de un canal hasta la elevación 0+92.0, lo que implicaba cortes en el material fallado del orden de 70 a 80 m lo cual tenía algunos riegos, como la reactivación del deslizamiento o fallas locales de los taludes por los trabajos de excavación, o una erosión progresiva de canal por el gasto que pasaría en el, con la probabilidad de un arrastre súbito de todo el tapón.

Después de analizar la problemática del río obstruido y las implicaciones de lluvias inminentes en los meses de noviembre y diciembre se construyó, en una primera etapa, un canal de 800 m de largo con una sección trapecial de 6 m en su base, 80 m en promedio en su parte superior y una profundidad promedio de 28 m, desplantado sobre la elevación 92 m.s.n.m. Este canal permitiría el paso de avenidas extraordinarias en caso de que se presentaran.

El esfuerzo realizado, la planeación y coordinación de los trabajos de la excavación permitió llegar a la cota 92 y remover más de un millón 200 mil m³ de arcilla y roca en bloques medianos a grandes, logrando la abertura del tapón el 18 de diciembre de 2007.

El reto no terminó y fue necesaria una segunda etapa que se enfocó en ampliar la capacidad del canal y en incrementar la estabilidad de sus márgenes, para estabilizar los niveles de los embalses de las presas y evitar la inundación de los poblados, para lo cual se decidió profundizar el piso del canal hasta la elevación +85.0, con un ancho de plantilla de 70 m, y tender sus taludes a valores de 1:1 (H: V). En marzo de 2008, una vez alcanzado la elevación del proyecto, se realizó la reapertura del canal, transitando gastos superiores a los 2,000 m³/s.



Uno de los factores que provocaron el deslizamiento fueron los elevados niveles freáticos que prevalecían en la zona como consecuencia de las intensas lluvias y con el fin de evitar que esas condiciones se presentaran nuevamente en la zona deslizada fue necesario construir, en una tercera etapa, un drenaje que permitiera desalojar la mayor cantidad de agua en el menor tiempo posible, evitando la saturación y el incremento de niveles del agua subterránea.

Por lo anterior se construyó una zanja-dren atrás del cuerpo principal del movimiento para encausar los escurrimientos de agua superficial durante la temporada de lluvia y manantiales existente. Además de una galería de drenaje que permite desalojar el agua infiltrada al subsuelo.

La zanja-dren y la galería de drenaje son fundamentales para garantizar la estabilidad de los bloques de la margen derecha y poder reducir la inclinación de los taludes.

Con el objetivo de asegurar el libre curso del río, evitar futuras inundaciones y considerando el riesgo de reactivación de los bloques deslizados y la limitación en la vida útil del Canal debido a las condiciones de emergencia en que fue construido; se proyectaron y están en ejecución, dos túneles de conducción aguas arriba del Canal.

Los túneles de conducción del río Grijalva están ubicados en la margen izquierda del río y consisten en dos excavaciones de sección portal de 14 x 14 m con una longitud total de 1,200 y 1,187 m y 45 m entre los ejes de los túneles.

Estos trabajos dejan en manifiesto el gran liderazgo de la ingeniería mexicana a nivel mundial, pues se enfrentó el problema con decisión, profesionalismo ante las condiciones de riesgo, que debido a su alto grado de complejidad se diseñó y ejecutó en un tiempo record con el talento de ingenieros y empresas mexicanas que trabajaron en condiciones de adversidad logrando los objetivos fijados.



REFERENCIAS

1. Presentaciones del ingeniero Benjamín Granados Rodríguez, Subdirector de Construcción CFE.
2. Dr. Fernández González Villarreal (2008). “Análisis del riesgo derivado del deslizamiento de San Juan Grijalva”. Instituto de Ingeniería, UNAM.
3. Presentaciones del Dr. Humberto Marengo Mogollón, Coordinador de Proyectos Hidroeléctricos, CFE.
4. Comisión Federal de Electricidad (2008). “Deslizamiento en la comunidad Juan del Grijalva, Chiapas, México. Estudio para la recanalización del río 1^{ra} etapa”.
5. Comisión Federal de Electricidad (2008). “Deslizamiento en la comunidad Juan del Grijalva, Chiapas, México. Estudio para la recanalización del río 2^{ra} etapa”.
6. Comisión Federal de Electricidad, (2008). “Contingencia río Grijalva, Túneles de Conducción, desastres naturales, Chiapas, México, Informe final”.
7. Dr. Gabriel Fernández, (2010) “Construcción Túneles Río Grijalva”.
8. Torres Bonilla, Erick. “Informe de comportamiento Túneles Río Grijalva a diciembre de 2010”, Subgerencia de Seguridad de Estructuras, CFE.
9. Videos: Tapón del Grijalva, ICA y Modelo hidráulica del Instituto de Ingeniería.
10. Boletines emitidos por CFE, ICA, Instituto de Ingeniería (UNAM), CONAGUA, CICM.
11. <http://www.cfe.gob.mx>
12. <http://www.cna.gob.mx>
13. <http://www.cicm.org.mx/noticias>
14. <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/402/cuencas.html#top>
15. <http://www.imta.gob.mx/gaceta>
16. http://sepiensa.org.mx/contenidos/l_grijalva/grijalva_2.htm
17. <http://www.jornada.unam.mx/2007/12/03/>
18. <http://cfe.interalia.net/boletin/>

**LISTA DE FIGURAS**

FIG. 1. LOCALIZACIÓN DEL DESLIZAMIENTO SOBRE EL RÍO GRIJALVA.....	18
FIG. 2. ESTRATIGRAFÍA AMPLIADA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	20
FIG. 3. FALLAS EN LA ZONA DEL CAÍDO.	21
FIG. 4. MECANISMO DE FALLA.	23
FIG. 5. PLANO DE FALLA, VISTA HACIA AGUAS ABAJO.....	23
FIG. 6. BLOQUE DESLIZADO.....	24
FIG. 7. TAPÓN SOBRE EL RÍO GRIJALVA.....	25
FIG. 8. ESTRATIGRAFÍA EN LA ZONA DE FALLA.	26
FIG. 9. CANAL JUAN DE GRIJALVA, CHIAPAS.....	27
FIG. 10. MODELO GEOTÉCNICO.	28
FIG. 11. SECCIÓN ESQUEMÁTICA DEL CANAL QUE MUESTRA LOS VOLÚMENES A EXCAVAR EN CADA ETAPA.	31
FIG. 12. TRAZO DE LA EXCAVACIÓN DEL CANAL.	31
FIG. 13. SECCIÓN LONGITUDINAL DEL TRAZO DEL CANAL, VOLÚMENES DE EXCAVACIÓN.	32
FIG. 14. SECCIÓN GEOLÓGICA AL EJE DEL CANAL.	32
FIG. 15. INSTRUMENTACIÓN INICIAL INSTALADA EN EL CANAL.	34
FIG. 16. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TRAZO DEL CANAL.	36
FIG. 17. BATIMETRÍA EN EL EMBALSE DE LA C.H. PEÑITAS.	37
FIG. 18. CUENCAS HIDROLÓGICAS EN LA REGIÓN.	38
FIG. 19. CUENCA HIDROLÓGICA “EL TAPÓN”.....	39
FIG. 20. ÁREAS DE CAPTACIÓN, GALERÍA-DREN Y DREN-CORONA.	43
FIG. 21. ESQUEMA DE DRENAJE DE LA ZONA DESLIZADA.	44
FIG. 22. ESQUEMA DE LA ZANJA-DREN.	45
FIG. 23. ESQUEMA DE LA CAPTACIÓN DE ESCURRIMIENTOS DE LA ZANJA-DREN.	45
FIG. 24. ESQUEMA DE LA CAPTACIÓN DE ESCURRIMIENTOS.	46
FIG. 25. SECCIÓN LONGITUDINAL DE LA GALERÍA.	47
FIG. 26. ESQUEMA Y VISTA DE LA GALERÍA DE DRENAJE AGUAS ABAJO.....	48
FIG. 27. ESQUEMA Y VISTA DE LA GALERÍA DE DRENAJE UBICADA AGUAS ARRIBA.....	48
FIG. 28. ÉTAPAS DE SISTEMA DE BARRENOS DE DRENAJE.....	49
FIG. 29. ESQUEMA DE LOS TRATAMIENTOS DE REFUERZO EN LAS GALERÍAS.	49
FIG. 30. LOCALIZACIÓN DE LOS POZOS DE ABATIMIENTO.....	50
FIG. 31. ZONA DE ESTUDIO PARA LOS TÚNELES DE DESVÍO.	51
FIG. 32. VISTA DE LA ZONA DE ESTUDIO PARA LOS TÚNELES DE DESVÍO.	52
FIG. 33. GEOLOGÍA DE LOS TÚNELES DE CONDUCCIÓN, CORTE LONGITUDINAL POR EL EJE DE CADA TÚNEL.	54
FIG. 34. MODELO CONCEPTUAL GEOHIDROLÓGICO.	54